

HyDelta 2

WP6B – Veiligheid – geschiktheid van assets en werkmethodes

D6B.2A - Rapportage van ontsteekscenario's bij het gebruik van gasblazen // D6B.2B - Rapportage van resultaten van ontstekingsproeven

Status: definitief

Document samenvatting

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	S.L.M. Lueb
Verbonden aan	Kiwa Technology
E-mailadres	sander.lueb@kiwa.com

Document historie

Versie	Datum	Auteurs	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	08-02-23	Sander Lueb, Michel Bos	Kiwa Technology	Concept
2	13-03-23	Sander Lueb, Michel Bos	Kiwa Technology	Commentaar vanuit de EAG verwerkt.
3	24-03-23	Sander Lueb, Michel Bos	Kiwa Technology	Aanvullingen naar aanleiding van bespreking EAG op 15-03 en toevoeging van aanvullende resultaten lekdichtheidsmetingen (Ipco blazen DN 60 en DN 200 en aan Kleiss blaas DN 200)
def	24-04-23	Sander Lueb, Michel Bos	Kiwa Technology	Verwerking enkele commentaarpunten vanuit de Supervisory Group en toevoegingen koppelingen videomateriaal.

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	Arie Kooiman
RENDO	Johan Jonkman
Stedin	Gilles de Kok
Enexis	Henk Smit
Westland Infra	Rick den Hartog
Liander	Rob Nispeling
Coteq	Henk Engberts
Kleiss	Alex Punt
Ipco	André van den Heuvel
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group

Samenvatting

In het kader van het nationale onderzoeksprogramma HyDelta is een onderzoek uitgevoerd naar de geschiktheid van gasblazen als snelle tijdelijke afdichting in een waterstof distributienet (van de RNB's).

Het onderzoek zoals beschreven in dit rapport is onderdeel van het werkpakket D6-B2 "Veilig gebruik van waterstof in het lage druk distributienet en bebouwde omgeving; geschiktheid van assets en werkmethodes". In het transportnet (van GTS) worden ook gasblazen toegepast, maar de toepassing is daarbij anders dan bij de toepassing in een distributienet. De resultaten in dit rapport hebben geen betrekking op de toepassing van blazen in het gastransportnet.

De onderzoeksvraag die in de rapport is behandeld is als volgt;
Zijn de gasblazen zoals ze nu worden toegepast in een aardgas distributienet geschikt voor de toepassing in een waterstof distributienet?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn er een achttal deelvragen geformuleerd. Deze zijn beantwoord door uitvoering van een theoretisch onderzoek en door de uitvoering van praktische experimenten. Het theoretisch onderzoek heeft zich gericht op ontsteekscenario's bij het gebruik van gasblazen en ervaringen van netbeheerders met niet goed functionerende gasblazen.

Het praktische onderzoek bestond uit;

- Uitvoering van lekdichtheidsmetingen aan twee typen blazen in twee soorten buismaterialen (PVC en PE) en vier verschillende diameters.
- Bepaling van het maximale lekdebiet waarbij de concentratie in een werkput kleiner dan 10% LEL blijft.¹
- Vaststellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij een directe ontsteking van lekgas nabij het buiseind.
- Vaststellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij ontsteking van een brandbaar mengsel in de werkput als gevolg van een groter lekdebiet vanuit het buiseind.
- Vaststellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij het doven van een gasbrand.

De voorgenoemde experimenten zijn uitgevoerd met zowel waterstof als met aardgas.

De hoofdconclusies uit dit onderzoek zijn als volgt;

Gasblazen zoals ze nu worden toegepast in een aardgas distributienet kunnen met inachtneming van aanvullende maatregelen ook worden toegepast in een waterstof distributienet.

Bij reguliere werkzaamheden is er bij het plaatsen van gasblazen op een afstand van 1 meter vanaf een uitstroomopening geen verschil tussen een aardgas- en waterstof distributienet. Een klein aardgaslek (< 0,2 m³/h) en een klein waterstoflek (<0,6 m³/h) nabij de blaas bleken te kunnen worden

1

100% LEL = 5,9% Gronings aardgas

100% LEL = 4,0% Waterstof

Met LEL wordt de onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Onder de onderste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende brandstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met LEL en LFL wordt dezelfde onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de LEL/LFL 4 vol% waterstof in lucht.

Met UEL wordt de bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Boven de bovenste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende zuurstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met UEL en UFL wordt dezelfde bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de UEL/UFL 75 vol% waterstof in lucht.

Kiwa hanteert voor de onderste en bovenste brandbaarheidsgrens van een gas respectievelijk de afkorting LEL en UEL. Kiwa hanteert deze afkortingen om de aansluiting te houden met Nederlandse en Europese normen en geen begripsverwarring te veroorzaken.

ontstoken. Hierdoor kan de blaas stuk gaan; dit was bij het aardgaslek ook het geval. Dit soort falen heeft zich tot nu toe in de praktijk slechts beperkt voorgedaan. Het voorkomen van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen in de werkput is en blijft echter een belangrijk punt om dit falen bij aardgas én bij waterstof te voorkomen. Het nemen van enkele aanvullende maatregelen kunnen risico's verder verlagen.

Bij incidentbestrijding worden gasblazen op een veilige afstand geplaatst (o.a. afhankelijk van windrichting en daarmee samenhangende LEL grens) vanaf een uitstroomopening geplaatst. Bij deze praktijkproef is gekozen voor een afstand van 20 meter. Voor de toepassing in waterstofnetten, zijn de huidige blazen niet geschikt zonder dat er aanvullende maatregelen worden getroffen. Het is namelijk gebleken dat bij een beperkt lekdebiët waterstof én ontsteking daarvan een blaas los kan schieten als gevolg van de heftige ontsteking.

Maatregelen om de risico's te verkleinen zijn onder andere het toepassen van een dubbele blaas (block & bleed), het geforceerd ventileren van de werkput en het meten van de gasconcentratie nabij het buiseind. De effectiviteit en inpasbaarheid van deze maatregelen zullen nader onderzocht dienen te worden. In dit rapport zijn aanbevelingen opgenomen voor fabrikanten van gasblazen, het College van Deskundigen Gastec QA en regionale netbeheerders.

Inhoud

Document samenvatting	2
Samenvatting.....	3
Inhoud	5
1. Aanleiding.....	7
1.1 Algemeen.....	7
1.2 Probleemstelling.....	7
1.3 Doelstelling.....	7
1.4 Onderzoeksvragen.....	7
2. Methode.....	9
2.1 Aanpak theoretisch onderzoek	9
Literatuuronderzoek naar inzichten bij het gebruik van gasblazen.	9
Beknopt marktonderzoek.....	9
Lekdichtheid uit keuringseisen.....	9
Ongevallen met gasblazen	9
2.2 Aanpak lekdichtheidsmetingen	9
2.3 Aanpak bepaling maximaal debiet waarbij concentratie in de werkput < 10% LEL blijft	10
2.4 Directe ontsteking bij een waterstof- of aardgaslek	11
2.5 Vertraagde ontsteking van een waterstof- of aardgaslek.....	15
2.6 Plaatsing van een blaas nadat waterstof of aardgas is ontstoken	16
3. Literatuuronderzoek.....	18
3.1 Inzichten bij het gebruik van gasblazen.	18
3.2 Beknopt marktonderzoek.....	18
3.3 Ontsteekscenario's	19
3.4 Onderzoek naar falen gasblazen in de praktijk	20
Ongevallenregistratie Kenniscentrum Gasnetbeheer	20
Meldingen van incidenten via netbeheerders	20
3.5 Gastec QA criteria.....	22
4. Meetresultaten en bevindingen.....	23
4.1 Lekdichtheid	23
4.2 Maximaal debiet waarbij concentratie < 10% LEL.....	25
4.3 Directe ontsteking bij een waterstof- of aardgaslek	29
4.3.1 Directe ontsteking aardgas - 1 meter	29
4.3.2 Directe ontsteking waterstof – 1 meter	30
4.3.3 Directe ontsteking aardgas – 20 meter	31

4.3.4	Directe ontsteking waterstof – 20 meter	32
4.4	Vertraagde ontsteking van een waterstof- of aardgaslek	33
4.4.1	Vertraagde ontsteking aardgas - 1 meter.....	33
4.4.2	Vertraagde ontsteking waterstof – 1 meter.....	35
4.4.3	Vertraagde ontsteking aardgas – 20 meter.....	37
4.4.4	Vertraagde ontsteking waterstof – 20 meter.....	40
4.5	Plaatsing van een blaas nadat waterstof of aardgas is ontstoken	42
4.5.1	Plaatsing blaas bij brand van vrij uitstromend aardgas.....	42
4.5.2	Plaatsing blaas bij brand van vrij uitstromend waterstof.....	43
5.	Mitigerende maatregelen	45
6.	Conclusies.....	47
6.1	Beantwoording van de onderzoeksvragen.....	47
6.2	Onderling verband tussen de lekdichtheidsmetingen, concentratiemetingen en ontstekingsproeven.....	49
7.	Aanbevelingen	51
	Referenties	53
	Bijlagen	54
I.	Overzicht ongevallen database Kiwa Technology	55
II.	Ontvangen reacties netbeheerders.....	56
III.	Verwachte effecten bij vertraagde ontsteking.....	57
IV.	Concentratie­metingen in een werkput	59
V.	Overzicht van uitgevoerde metingen op de Twente Safety Campus	66
VI.	Temperatuurmetingen ontstekingsproeven	68
VII.	Concentratie­metingen ontstekingsproeven.....	71
VIII.	Warmtebeelden	79
IX.	Beoordeling van gebruikte blazen.....	81
X.	Koppelingen naar videomateriaal	85

1. Aanleiding

1.1 Algemeen

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het nationale onderzoeksprogramma HyDelta. Dit programma is gericht op het veilig inpassen van waterstof in de bestaande infrastructuur voor gastransport en gasdistributie en heeft als doel om barrières voor innovatieve waterstofprojecten weg te nemen. Het volledige onderzoeksprogramma is ingedeeld in werkpakketten. Voor een toelichting op de verschillende werkpakketten zie www.hydelta.nl

Dit rapport heeft betrekking op de toepassing van gasblazen in het distributienet. In het transportnet worden ook gasblazen toegepast, maar dan achter een zogenaamde “stopple”. In deze toepassing heerst er nagenoeg geen drukverschil over de blaas en is de blaas altijd onderdeel van een zogenaamde “block & bleed” toepassing.

1.2 Probleemstelling

In het huidige aardgasnet worden onder andere gasblazen gebruikt in geval van tijdelijke afsluitingen (incidenten of werkzaamheden aan het gasnet). Het is niet duidelijk of de huidige toepassing van gasblazen (procedures en middelen) ook op dezelfde kan gaan gelden voor waterstof. Dit met name vanwege de verschillen in de eigenschappen van aardgas en waterstof zoals dichtheid, brandbaarheidsgrenzen, verbrandingssnelheid en explosiekracht. Naast de ongewenste gevolgen zoals brand en explosie is een snellere verdringing van zuurstof ook een aspect waarmee rekening gehouden dient te worden.

1.3 Doelstelling

Vaststellen of gasblazen geschikt zijn als snelle tijdelijk afdichting in een waterstofdistributienet.

1.4 Onderzoeksvragen

De hoofdvraag zoals behandeld in dit rapport is als volgt;

- Zijn de gasblazen zoals ze nu worden toegepast in een aardgasdistributienet geschikt voor de toepassing in een waterstofdistributienet?

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn de volgende deelvragen geformuleerd;

- Wat zijn de lekdebieten van gasblazen zoals ze nu worden gebruikt in het aardgasnet als deze worden toegepast in een waterstofnet?
- Hoe moeten werkprocedures worden aangepast?
- Welk maximaal lekdebiet is acceptabel bij de toepassing van gasblazen in een waterstofnet om zodoende nog veilig te kunnen werken in een werkput?
- Hoe gedraagt een gasblaas zich in het geval van een directe ontsteking (brand) van lekgas bij het buiseinde?
- Hoe gedraagt een gasblaas zich in het geval van een explosie in de werkput (verschillende gasconcentraties) ?

- Hoe gedraagt een gasblaas zich (bij het stoppen van de gastoevoer) in geval van het doven van een gasbrand ter plaatse van het buiseind?
- Welke ontstekingsscenario's zijn denkbaar bij het gebruik van gasblazen? (theoretisch onderzoek)
- Welke aanvullende mitigerende maatregelen zijn denkbaar om ongewenste effecten van het ontsteken van waterstof te voorkomen? (theoretisch onderzoek)

2. Methode

2.1 Aanpak theoretisch onderzoek

Voor het theoretisch onderzoek zijn verschillende bronnen onderzocht. In de onderstaande paragrafen is voor elke bron de aanpak uiteengezet. De resultaten van dit onderzoeksdeel zijn weergegeven in hoofdstuk 3.

[Literatuuronderzoek naar inzichten bij het gebruik van gasblazen.](#)

Er is in de beschikbare literatuur gezocht naar informatie over het gebruik van gasblazen in combinatie met waterstof, onder andere het Kiwa rapport GT-200231 Veilig sectioneren van Waterstofnetten. Ook is gezocht op internet en is gezocht naar beschikbaar onderzoek via ScienceDirect.

[Beknopt marktonderzoek](#)

Er is in de markt gezocht naar leveranciers die gasblazen leveren voor waterstofnetten.

[Lekdichtheid uit keuringseisen](#)

In de keuringseisen voor gasblazen is nagegaan welke eisen er worden gesteld aan de lektheid van de gasblazen.

[Ongevallen met gasblazen](#)

Op twee manieren is gekeken naar mogelijke ongevallen met gasblazen. De eerste manier is het zoeken naar incidenten waarbij de gasblaas als storingsbron is aangegeven in de ongevalsrapportages. Deze rapportages worden in het kader van de registratie van de incidentmeldingen voor het Kenniscentrum Gasnetbeheer door de netbeheerders bij Kiwa aangeleverd. Hierbij is de periode vanaf 2003 beschouwd.

Bij het bovenstaande onderzoek zijn er nagenoeg geen incidenten of ervaringen naar voren gekomen waarbij ontsteking van lekkend gas heeft plaats gevonden. Daarom is (dat is de tweede manier) bij de netbeheerders navraag gedaan wat de overige ervaringen zijn met het falen van gasblazen in het aardgasnetwerk. De resultaten van deze uitvraag zijn samengevat in hoofdstuk 3.

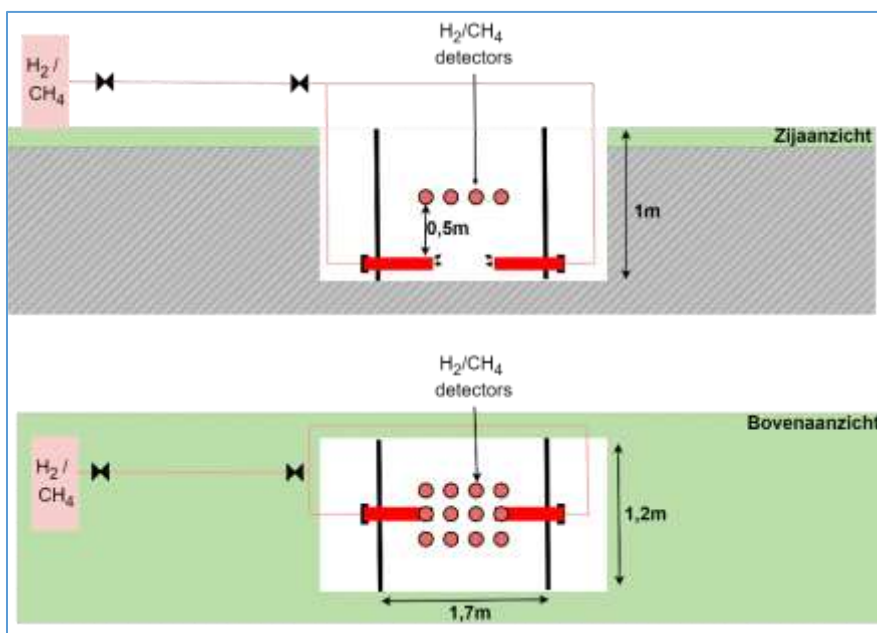
2.2 Aanpak lektheidsmetingen

In overleg met de Expert Assessment Group is besloten om twee type blazen (Kleiss en Ipco), twee buismaterialen (PVC en PE) en vier verschillende diameters te testen: 63, 110, 160 en 200 mm. Er is zoveel als mogelijk getest aan reeds gebruikte blazen, welke zijn aangeleverd door de verschillende netbeheerders. Er is getest bij een druk van 100 en 200 mbar, zowel met aardgas als met waterstof. Het betrof geen dichtheidstest conform KE 194 (die duurt 30 minuten per beproeving) aangezien de volgende werkwijze is gehanteerd. Nadat het buisdeel (ongeveer 1 meter lengte) met daarin de op werkdruk gebrachte blaas, op druk is gebracht met het betreffende gas, is de omvang van de lekkage met een flowmeter vastgesteld. Tussen het omschakelen naar een ander gas, is de blaas leeggelaten en opnieuw op druk gebracht.

2.3 Aanpak bepaling maximaal debiet waarbij concentratie in de werkput < 10% LEL blijft

In een werkput op het terrein van Kiwa Technology zijn twee leidingdelen aangebracht (PVC, diameter 160 mm). De werkput had afmetingen van 1,7 meter bij 1,2 meter (2 m²) en een diepte van 1 meter. In de werkput zijn 12 meetpunten aangebracht ter bepaling van het percentage LEL. De lek grootte is ingesteld met behulp van rotameters. Tijdens de metingen zijn buitentemperatuur en windsnelheid vastgelegd. Om eventuele invloed van wind te elimineren is een tent boven de werkput geplaatst.

Door te meten met verschillende lekdebieten is vastgesteld wat het maximum debiet is waarbij de gasconcentratie kleiner dan 10% LEL blijft. Dit maximum debiet is vastgesteld voor zowel aardgas als waterstof. Hieronder staat een schematische weergave van de testopstelling alsmede enkele foto's van de praktijktest.



Figuur 1 Schematische weergave meetopstelling maximum debiet bij concentratie < 10% LEL



Foto 1 en Foto 2 De werkput en de tent ter afscherming van eventuele wind

Bij de metingen zijn drie van de vier tentzijden volledig afgesloten. De andere zijde is gedeeltelijk afgesloten met het rode scherm zoals zichtbaar op de foto. Waar in hoofdstuk 4 wordt gesproken

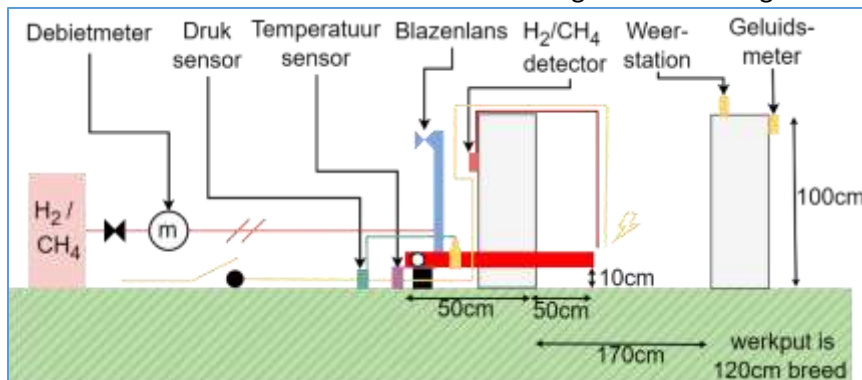
over één zijkant half open, dan betreft dat het openen van het deel zoals aangewezen met de gele pijlen op de foto.

2.4 Directe ontsteking bij een waterstof- of aardgaslek

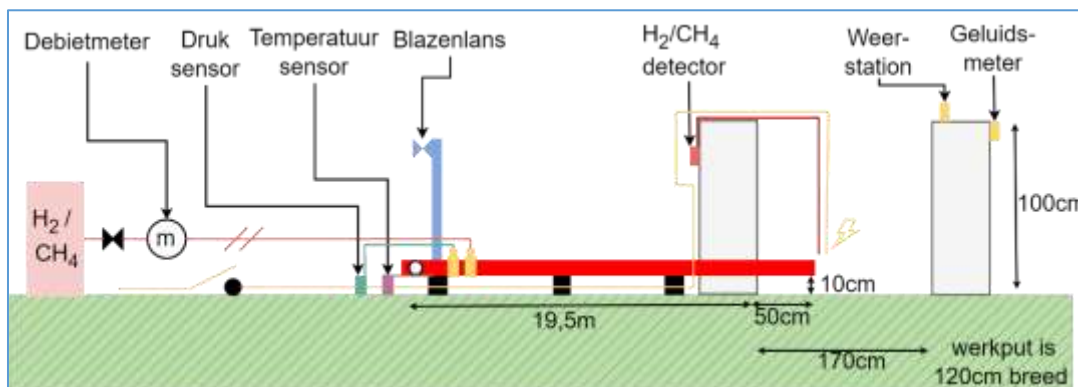
Deze metingen zijn op het terrein van de Twente Safety Campus uitgevoerd. De metingen vonden bovengronds plaats, waarbij met betonblokken een werkput is gemaakt waar de gasleiding in uitmondde. De gegevens hierbij en de meetwijze zijn als volgt:

- PE buis met een diameter van 160 mm en een SDR klasse 17,6
- De blaas werd geplaatst op twee verschillende afstanden (1 en 20 meter) van de werkput
- Blaas van het fabricaat Kleiss (deze wordt het meest in Nederland toegepast)
- Het gas werd bij de meting met 1 meter buislengte toegevoerd via de blazenlans
- Het gas werd bij de meting met 20 meter buislengte toegevoerd via een zadel.
- De directe ontsteking werd aangebracht met een continu actieve vonkontsteker op korte afstand (2cm) van de uitstroomopening van de PE buis (160mm).
- Na ontsteking werd de gastoevoer gestopt
- De temperatuursensor is tussen de blaas en de leiding aangebracht (met het meetpunt in het gasvoerende deel van de buis)

Hieronder staan de schema's van de uitgevoerde metingen met directe ontsteking.



Figuur 2 Meetopstelling directe ontsteking met een buislengte van 1 meter



Figuur 3 Meetopstelling directe ontsteking met een buislengte van 20 meter

Hiernavolgend staan foto's van de praktijktest.



Foto 3 De opstelling met de buis van 1 meter.

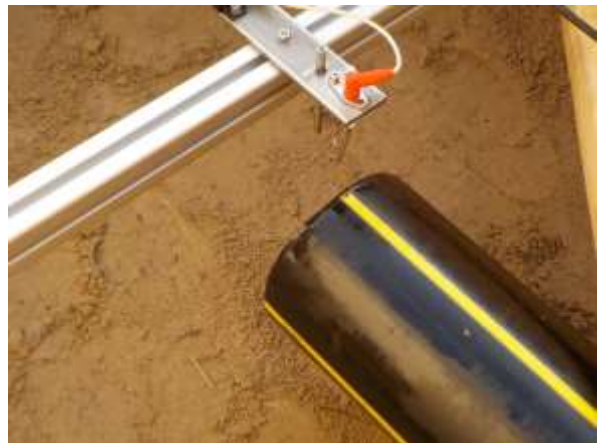


Foto 4 en Foto 5 De positie van de vonkontstekers.



Foto 6 De opstelling met de buis van 20 meter



Foto 7 Overzicht van de werkput

Een overzicht van alle uitgevoerde metingen op de Twente Safety Campus staat in bijlage V.

NB.

- Bij de metingen 1 t/m 7 (directe ontsteking aardgas resp. waterstof) is een rek met vier vonkontstekers toegepast, dat ook is gebruikt bij de metingen met vertraagde ontsteking.
- Bij metingen 21 en 22 (directe ontsteking waterstof) is een enkele vonkontsteker nabij de uitstroomopening toegepast.
- Bij de metingen met vertraagde ontsteking (metingen 8 t/m 20 en 23 t/m 37) is het rek op een hogere positie geplaatst. Zie hiervoor Foto 8 Verhoogde posities van vonkontstekers.

Voor het lekdebiet aardgas bij meting 1 en 2 is de waarde $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ gekozen. Dit debiet kan volgens de resultaten verkregen bij de uitgevoerde metingen zoals beschreven in 2.3 (bij een lekkage vanuit twee uitstroomopeningen) leiden tot concentraties in de werkput $> 10\%$ LEL. De gekozen waarden van $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ is daarmee lager dan het maximum volgens QA 194 (dat is $0,463 \text{ m}^3/\text{h}$ aardgas, zie voor een toelichting 3.5) en gelijk aan het aardgasdebiet dat is te verwachten op basis van de (strengere) QA-criteria KE 214 (dat is $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$).

Vervolgens is er voor gekozen om bij meting 3 en 4 het debiet voor waterstof 3 keer hoger te kiezen als de waarde voor aardgas van $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$, oftewel een waterstofdebiet van $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$. Een factor 3 is het maximum bij een zuiver turbulente stroming van het lekdebiet en is daarmee een worse-case scenario.

Bij de meting van directe ontsteking van een klein lekdebiet aardgas in een leiding van 20 meter (meting 5 en 6) is er voor gekozen om het debiet te verhogen naar $0,20 \text{ m}^3/\text{h}$ omdat bij een debiet van $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ na 15 minuten meten nog geen waarneembare concentratie aardgas bij de uitstroomopening kon worden gemeten. De waarde $0,20 \text{ m}^3/\text{h}$ aardgas is nog steeds kleiner dan het maximum volgens QA-criteria 194 (dat is $0,463 \text{ m}^3/\text{h}$, zie voor een toelichting 3.5). Vervolgens is er voor gekozen om bij meting 7, 21 en 22 het debiet voor waterstof wederom 3 keer hoger te kiezen als de gehanteerde waarde voor aardgas, oftewel een waterstofdebiet van $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$. Een factor 3 is ook hierbij het maximum bij een zuiver turbulente stroming van het lekdebiet en is daarmee een worse-case scenario.

Nb de gekozen lekdebieten voor waterstof ($0,45 \text{ m}^3/\text{h}$ en $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$) zijn kleiner of gelijk aan het maximum lekdebiet waterstof dat is te verwachten op basis van QA-criteria 194 ($0,6 \text{ m}^3/\text{h}$), maar groter dan het maximum lekdebiet waterstof dat is te verwachten op basis van QA-criteria 214 ($0,2 \text{ m}^3/\text{h}$). Zie voor een nadere toelichting ook 3.5

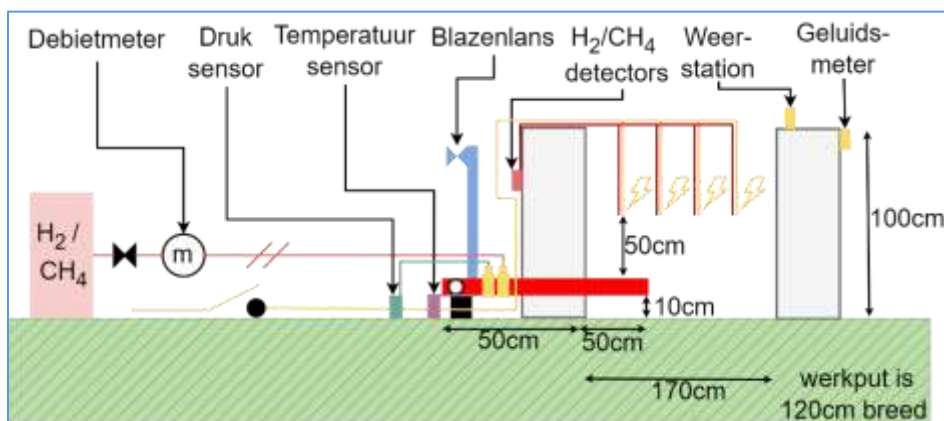
In het kader van deze toepassing, buiten in een open werkput, is een aardgaslekkage $< 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ en een waterstoflekkage $< 0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ als kleine gaslekkage op te vatten.

2.5 Vertraagde ontsteking van een waterstof- of aardgaslek

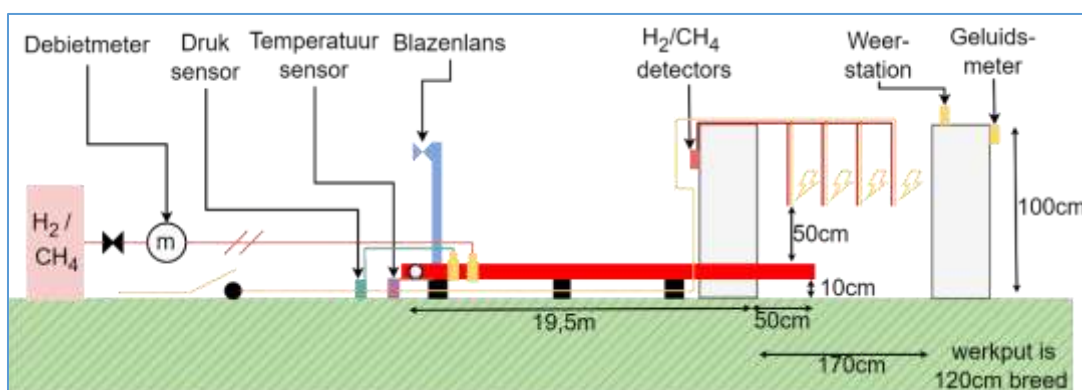
Deze metingen zijn op het terrein van de Twente Safety Campus uitgevoerd. De metingen vonden bovengronds plaats, waarbij met betonblokken een werkput is gemaakt waar de gasleiding in uitmondde. De gegevens hierbij en de meetwijze zijn als volgt:

- PE buis met een diameter van 160 mm en een SDR klasse 17,6.
- De blaas werd geplaatst op twee verschillende afstanden van de werkput.
- Blaas van het fabricaat Kleiss (deze wordt het meest in Nederland toegepast).
- Het gas werd toegevoerd via een zadel.
- De ontsteking werd geactiveerd bij het bereiken van de beoogde gasconcentraties.
- Na ontsteking werd de gastoevoer gestopt.
- De temperatuursensor is tussen de blaas en de leiding aangebracht (met het meetpunt in het gasvoerende deel van de buis).
- De ontsteking werd gerealiseerd met vier vonkontstekers die 60 cm boven de bodem van de werkput, in de lijn boven de buis waren gepositioneerd.

De meetopstelling zoals gebruikt bij de vertraagde ontstekingsproeven is grotendeels gelijk aan de meetopstelling zoals gebruikt bij de directe ontstekingsproeven. Het belangrijkste verschil is de positie van de ontstekers. Bij de vertraagde ontstekingsproeven zijn de ontstekers op grotere afstand van de uitstroomopening geplaatst.



Figuur 4 Meetopstelling vertraagde ontsteking met een buislengte van 1 meter



Figuur 5 Meetopstelling vertraagde ontsteking met een buislengte van 20 meter



Foto 8 Verhoogde posities van vonkontstekers voor de test met vertraagde ontsteking

2.6 Plaatsing van een blaas nadat waterstof of aardgas is ontstoken

Deze metingen zijn op het terrein van de Twente Safety Campus uitgevoerd. De metingen vonden bovengronds plaats, waarbij met betonblokken een werkput is gemaakt waar de gasleiding in uitmondde. De gegevens hierbij en de meetwijze zijn als volgt:

- PE buis met een diameter van 160 mm en een SDR klasse 17,6.
- De blaas werd geplaatst op 20 meter vanaf de uitstroomopening.
- De blaas is van het fabricaat Kleiss (deze wordt het meest in Nederland toegepast)
- Het gas werd toegevoerd via een zadel.
- Bij de metingen met aardgas (40 t/m 42) is het gas ontstoken met een in de werkput geplaatste gasbrander. Dit om het wegsmelten van een vonkontsteker te voorkomen. Bij metingen met waterstof is de eerste meting (43) in deze serie uitgevoerd met een gasbrander, daarna is overgestapt op een vonkontsteker. Zie voor een toelichting 4.5.2. Bij de ontsteking van waterstof met de vonkontstekers is de vonk enige tijd na het vrijkomen van waterstof aangebracht.
- Na ontsteking van het gas werd de blaas opgepompt.
- De temperatuursensor is bij deze metingen aangebracht in een zadel.

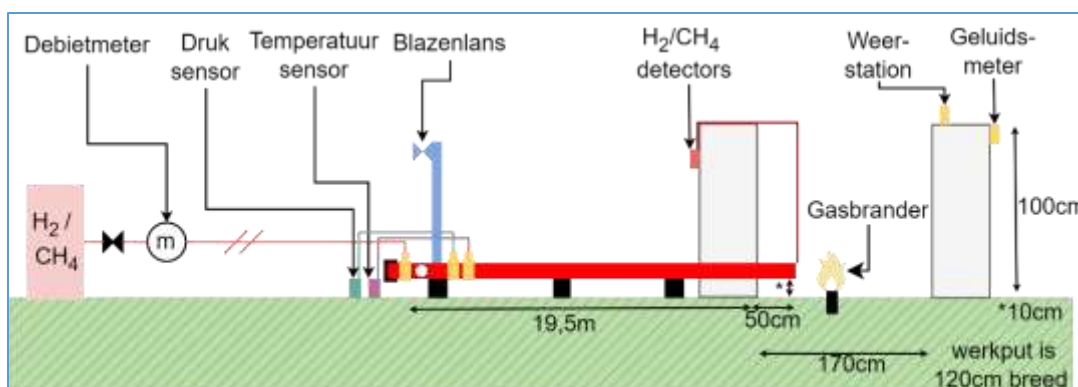


Foto 9 Meetopstelling doven van een gasbrand

Zie de volgende pagina's voor enkele foto's van de meetopstelling.



Foto 10 en Foto 11 De meetopstelling zoals gebruikt met het zetten van een blaas in geval van een gasbrand.

Op foto 11 de zadels met daarin de druksensor en de temperatuursensor



Foto 12 met de positie van de gasbrander als ontstekbron en Foto 13 de vonkontstekers als ontstekbron

3. Literatuuronderzoek

3.1 Inzichten bij het gebruik van gasblazen.

In het huidige lagedruk aardgasnet (≤ 200 mbar) worden voor het sectioneren en druk-/gasloos maken van leidingdelen veelal gasblazen gebruikt. Gasblazen zijn tijdelijke afsluitmiddelen en zijn ballonvormig. Ze kunnen in een onder druk staande gasbuis worden aangebracht en vervolgens worden opgeblazen om op die manier de leiding af te dichten. De gasblazen worden gebruikt bij verschillende type werkzaamheden, zoals het in- of uitbouwen van leidingdelen of het stoppen van de vrije gasuitstroom naar aanleiding van een lekkage.

Het Kiwa rapport GT-200231 Veilig sectioneren van Waterstofnetten [1] is beoordeeld. De belangrijkste conclusies uit dit rapport zijn dat bij gepland werk, de risico's met waterstof als gelijkwaardig worden geschat als nu het geval is met aardgas. Hierbij wordt wel het advies gegeven om het leidingdeel waaraan gewerkt moet worden, na het zetten van de blazen te spoelen met stikstof.

Een ander belangrijk advies uit het rapport is om te onderzoeken wat de effecten zijn van kleine lekkages van blazen op gasconcentraties in de gasleiding, en daarmee de kans op het ontstaan van een explosief mengsel. Aangezien waterstof ruimere brandbaarheidsgrenzen² en een hogere verbrandingssnelheid heeft dan aardgas, neemt de kans op ontsteking toe én kan de druk door een ontbranding hoger worden. Hierdoor zou een blaas kunnen bezwijken met volledige gasuitstroom tot gevolg.

Uit verder onderzoek op internet is één onderzoek gevonden dat betrekken heeft tot dit onderzoek. DVGW heeft het onderzoek "H2STOP" [2] uitgevoerd. In dat onderzoek zijn gasblazen getest met aardgas waarin waterstof is bijgemengd met bijmenggehalten tussen 0% tot 50%. De toegepaste drukken zijn 1 t/m 5 bar. De conclusies van het rapport zijn dat gasblazen voor een gemengd gas veilig kunnen worden toegepast. Wat daarbij opviel is dat alleen bij 5 bar en een hoge concentratie waterstof, er drie keer zoveel waterstof lekte als bij dezelfde test met 100% aardgas.

3.2 Beknopt marktonderzoek

Er is een beknopt marktonderzoek uitgevoerd. Hieruit zijn geen andere leveranciers gevonden die gasblazen leveren die beproefd zijn voor het gebruik in 100% waterstofnetten. De gasblazen van Kleiss en IPCO hebben beide het waterstofcertificaat op basis van keuringseis 214. Dit zijn ook de enige fabricaten gasblazen die het QA certificaat hebben. Overige internationale leveranciers van gasblazen, zoals Hütz+Baumgarten, Städtler+Beck, PLCS en WASK hebben geen certificering voor de

² Gronings aardgas ; LEL = 5,9% en UEL = 15,5%

Waterstof; LEL = 4,0% en UEL = 75%

Met LEL wordt de onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Onder de onderste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende brandstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met LEL en LFL wordt dezelfde onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de LEL/LFL 4 vol% waterstof in lucht.

Met UEL wordt de bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Boven de bovenste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende zuurstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met UEL en UFL wordt dezelfde bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de UEL/UFL 75 vol% waterstof in lucht.

Kiwa hanteert voor de onderste en bovenste brandbaarheidsgrens van een gas respectievelijk de afkorting LEL en UEL. Kiwa hanteert deze afkortingen om de aansluiting te houden met Nederlandse en Europese normen en geen begripsverwarring te veroorzaken.

keuringseis 214 of een daaraan gelijkwaardig certificaat of ander bewijs dat die blazen bestand zijn tegen waterstof.

3.3 Ontsteekscenario's

De ontsteekscenario's zijn gebaseerd op NPR 7910-1:2020. Tevens is gekeken naar de beoordeelde incidentrapportages en de antwoorden op de vragenlijsten over het falen van gasblazen.

Voor de manier waarop een gas-luchtmengsel in of nabij een werkput kan worden ontstoken, worden de volgende bronnen onderscheiden:

- *Hete oppervlakken*
De zelfontbrandingstemperatuur van waterstof is 585°C (bij aardgas is die 670°C). De kans dat er voorwerpen in een werkput komen die een hogere temperatuur hebben is klein, echter het incident van de Prins Hendrikkade in Amsterdam (2020) kan mogelijk zijn geïnitieerd door een te heet geworden oppervlak in de elektroloasmof.
- *Open vuur*
Het gebruik van aanstekers, branders e.d. kunnen leiden tot een ontsteking van waterstof en aardgas.
- *Sigaretten*
De temperatuur van een sigaret zelf is maximaal 400°C, dit is dus in principe onvoldoende om waterstof of aardgas te kunnen ontsteken. Echter om een sigaret aan te steken met bijvoorbeeld een aansteker is wel voldoende energie aanwezig om waterstof en aardgas te ontsteken. Of de vonkvorming die optreedt bij het weggooien van een sigaret, waterstof kan laten ontsteken is niet bekend.
- *Gevelkachels*
Dit type kachels wordt steeds minder toegepast. Indien een aardgasnet wordt overgezet op waterstof, dan zal dit type kachel niet meer worden aangesloten. In een wijk die volledig is overgezet op waterstof zal de kans dat dit type kachel tot ontsteking kan leiden nihil zijn. Echter als er een waterstofdistributieleiding door een woonwijk heen is gelegd, bestaat deze mogelijkheid nog wel als er een lek in de distributieleiding ontstaat.
- *Statische elektriciteit (kleding, kunststof buismaterialen)*
De hoeveelheid energie die nodig is om waterstof aan te steken is veel kleiner dan bij aardgas, zeker rondom het stoichiometrisch mengsel (bij een stoichiometrisch mengsel is dat $\pm 0,02$ mJ versus $\pm 0,3$ mJ). Hierdoor is statische elektriciteit die wordt opgewekt door normale (vooral kunststof) kleding, al voldoende om waterstof te kunnen ontsteken. Ook statische elektriciteit vanwege kunststof buismaterialen kunnen zorgen voor een vonk met voldoende energie. Zonder mitigerende maatregelen is de kans op ontsteking van waterstof door statische elektriciteit zeker aanwezig.
- *Mechanisch opgewekte vonken (graafwerkzaamheden, stenen in de bodem, metaalbewerking/lassen)*
Mechanische vonken hebben meer energie dan statische elektriciteit en kunnen waterstof daarom makkelijker, en binnen een groter concentratiebereik ontsteken in vergelijking met aardgas. Met name het bewerken van metalen leidingen levert vaak veel vonken op, maar ook door graafwerkzaamheden, zowel mechanisch als handmatig, is de kans dat er een vonk optreedt groot.
- *Elektrisch installaties en gereedschap*

Vonkvorming in elektrische apparaten en/of gereedschappen hebben ook voldoende energie om waterstof en aardgas makkelijk te kunnen ontsteken. Elektrische apparatuur vormt daarmee een reële ontstekingsbron.

- *Blikseminslag*

Blikseminslag gaat gepaard met hoge spanningen en temperaturen, die ervoor kunnen zorgen dat waterstof en aardgas makkelijk kan ontsteken.

- *Zwerfstromen en beschermstromen kathodische bescherming*

De elektriciteitsstromen door zwerfstromen van bijvoorbeeld hoogspanningsleidingen of de beschermstromen van leidingen die actief kathodisch beschermd zijn, kunnen onder bepaalde omstandigheden zorgen voor vonkvorming met voldoende energie om waterstof en aardgas te kunnen ontsteken.

- *Mobiele telefoons*

Mobiele telefoons worden veelal beschouwd als potentiële ontstekingsbronnen. In het rapport "Gedrag van waterstof bij lekkages in het distributienet" [3] wordt echter gesteld dat de kans op ontsteking door een mobiele telefoon hoogst onwaarschijnlijk is.

- *Overige ontstekingsbronnen*

Er zijn nog een aantal andere mogelijk ontstekingsbronnen, die echter in de praktijk bij het werken met waterstof (en aardgas) in het distributienet niet tot een gevaarlijke situatie zullen leiden. Hierbij gaat het om de volgende ontstekingsbronnen:

- Hoogfrequente elektromagnetische golven
- Elektromagnetische golven
- Ioniserende straling (röntgenstraling)
- Ultrasone golven
- Adiabatische compressie en schokgolven
- Exotherme reactie, inclusief zelfontsteking

3.4 Onderzoek naar falen gasblazen in de praktijk

Ongevallenregistratie Kenniscentrum Gasnetbeheer

Er is onderzoek gedaan naar incidenten waarbij een gasblaas heeft gefaald, wat heeft geleid tot een incident. Dergelijke incidenten worden ook gemeld aan Kiwa in het kader van de ongevallenregistratie voor het Kenniscentrum Gasnetbeheer. In Bijlage II staan de beschrijvingen per incident aangegeven. In totaal zijn zes situaties gemeld, waarvan twee waarbij lekkend gas bij een blaas is ontstoken. De niet goed functionerende blazen betreft met name blazen in grotere diameters (DN 150 of groter).

Meldingen van incidenten via netbeheerders

Bij de resultaten in de vorige paragraaf moet worden aangegeven dat dit alleen de meldingen zijn die meldingsplichtig zijn volgens de eisen van de SODM. Om een beeld te krijgen van de overige meldingen, is een vragenlijst rondgestuurd naar alle netbeheerders met vragen over incidenten m.b.t. het falen van gasblazen. Elke netbeheerder heeft hierop gereageerd en er zijn in totaal 15 meldingen retour gestuurd. Bij twee (kleinere) netbeheerders zijn er geen incidenten bekend m.b.t. het falen van gasblazen. In tabel 1 zijn de resultaten weergegeven van de oorzaken van de gasblaas en het soort defect van de blaas.

Tabel 1: Oorzaak en soort defect van gefaalde gasblazen

Oorzaak:	Soort defect						Totaal	
	Blaas losgekomen		Blaas geknapt		Lekkage rondom blaas			
Externe warmtebelasting			1	7%	1	7%	2	13%
Te hoge druk			1	7%			1	7%
Verontreiniging leiding			2	13%	3	20%	5	33%
Te grote flow			2	13%			2	13%
Leeftijd/kwaliteit v d blaas			2	13%			2	13%
Verontreiniging blaas	2	13%					2	13%
Onbekend	1	7%					1	7%
Totaal	3	20%	8	53%	4	27%	15	100%

In Tabel 2 zijn de oorzaken van het falen van de gasblaas weergegeven in relatie tot het soort defect van de gefaalde blaas.

De gevolgen van het falen van blazen kunnen worden ingedeeld in twee categorieën. De eerste categorie is dat er minimale gevolgen zijn geweest. Dit komt vooral doordat er nog geen leiding doorgehaald was of doordat er achter de blaas een eindkap geplaatst was. Bij de tweede categorie heeft er gas vrij kunnen uitstromen, wat in een enkel geval heeft geleid tot brand en ook een aantal keren tot zeer grote gasstromen die ook lastig te stoppen waren met nieuwe blazen.

In dit kader is het zinvol om op te merken dat een netbeheerder een twintigtal niet goed functionerende blazen ter beoordeling naar Kiwa heeft verstuurd in het kader van een opdracht van het Kenniscentrum Gasnetbeheer. Een rapportage van dit onderzoek is nog niet publiekelijk beschikbaar. In basis komt het er op neer dat de betreffende netbeheerder vanaf de zomer van 2021 te maken heeft met lekkende gasblazen. De oorzaken van deze lekkages zijn divers; gescheurde blazen, gedeeltelijk gescheurde blazen bij de perskoppeling, lekkages op de koppeling van de blaaslans en een lekkage op een meetriet. Dit soort lekkages moeten of zullen in de praktijk opgemerkt worden door een blaaswacht die gedurende de aanwezigheid van een geplaatste blaas de druk in de blaas moet volgen. Deze bevindingen tonen in ieder geval aan dat een lekkage van een blaas niet is uit te sluiten.

Tabel 2 Gevolg t.o.v. soort defect van gefaalde gasblazen

Gevolg	Soort defect						Totaal	
	Blaas losgekomen		Geknapt		Lekkage rondom blaas			
	Aantal	Perc.	Aantal	Perc.	Aantal	Perc.	Aantal	Perc.
Minimaal (Cat I)	3	20%	4	27%	2	13%	9	60%
Grote gasuitstroom (Cat II)			4	27%	1	7%	5	33%
Onbekend					1	7%	1	7%
Totaal	3	20%	8	54%	4	27%	15	100%

3.5 Gastec QA criteria

Er zijn Gastec QA criteria voor tijdelijke afsluitelementen voor gasleidingen, zoals blazen. Deze zijn beschreven in KE 194 (februari 2019). Daarin is opgenomen dat de lekkage tussen afsluitelement en leiding maximaal 0,3 m³/h mag zijn bij toepassing buiten een gebouw. Beproeving of aan deze eis wordt voldaan, wordt uitgevoerd bij drukken van 100 en 200 mbar. Getest wordt zowel in een nodulair gietijzeren leiding als in een PE-leiding die ter plaatse van de blaas 10% ovaal is gedrukt. Hoewel niet in de criteria is benoemd, heeft Kiwa Nederland aangegeven dat deze beproevingen met lucht worden uitgevoerd. Voor toepassing met waterstof zijn aanvullende QA-criteria beschreven in KE 214 (september 2022) waarbij een eis van 0,1 m³/h wordt gehanteerd. Voor de uitvoering van de experimenten wordt verwezen naar KE 194. Het testen vindt derhalve dus plaats met een druk van 100 en 200 mbar en het medium lucht.

De lekdebieten zoals bepaald met lucht zullen bij toepassing van aardgas en waterstof groter zijn door het verschil in viscositeit, uitgaande van laminaire stroming. Voor de omrekening van lucht naar aardgas is een factor 1,54 van toepassing. Voor de omrekening van lucht naar waterstof is deze factor 2,00. Zie voor een nadere toelichting HyDelta rapportage D1C.2, dichtheid distributieleidingen [4]

De genoemde waarde van 0,3 m³/h, bepaald met lucht, komt overeen met een aardgaslek van $0,3 * 1,54 = 0,463$ m³/h. Dit op basis van een laminaire stroming. Voor waterstof zou dit een lek zijn van 0,6 m³/h.

De genoemde waarde van 0,1 m³/h bepaald met lucht komt overeen met een waterstoflek van $0,1 * 2,00 = 0,200$ m³/h. Voor een aardgaslek zou dit overeenkomen met een waarde van $0,1 * 1,54 = 0,154$ m³/h. Dit op basis van laminaire stroming.

4. Meetresultaten en bevindingen

4.1 Lekdichtheid

De beproevingen in 4.1 hebben als doel om vast te stellen wat de lekdebieten zijn van gasblazen zoals ze nu worden gebruikt in het aardgasnet als deze worden toegepast in een waterstofnet. De resultaten van de lekmetingen, die zijn uitgevoerd volgens de methode die in paragraaf 2.2 is beschreven, zijn samengevat in tabel 3.

De grenswaarde voor de lekdichtheid bij toepassing van aardgas is 0,463 m³/h (op basis van 0,3 m³/h met lucht, zie toelichting paragraaf 3.5). De grenswaarde voor de lekdichtheid bij toepassing van waterstof is 0,2 m³/h (op basis van 0,1 m³/h met lucht, zie toelichting paragraaf 3.5). Daar waar een gemeten waarde niet voldoet aan de genoemde grenswaarden is de gemeten waarde oranje gearceerd.

Tabel 3 Gemeten lekdebieten aan reeds in gebruik genomen blazen van de firma Kleiss

Diameter uitwendig (mm)	Diameter inwendig (mm)	Materiaal	Fabrikant v.d. blaas	Lekdebiet aardgas (m ³ /h)		Lekdebiet waterstof (m ³ /h)		Verhouding waterstof / ag	
				100 mbar	200 mbar	100 mbar	200 mbar	100 mbar	200 mbar
63	59	PVC	Kleiss	0,000	0,000	0,000	0,000	nvt	nvt
63	56	PE	Kleiss	0,000	0,000	0,000	0,000	nvt	nvt
110	104	PVC	Kleiss	0,000	0,000	0,001	0,001	nvt	nvt
110	90	PE	Kleiss	0,000	0,000	0,001	0,001	nvt	nvt
160	152	PVC	Kleiss	0,000	0,000	0,000	0,000	nvt	nvt
160	142	PE	Kleiss	0,000	0,000	0,000	0,000	nvt	nvt
200	190	PVC	Kleiss	0,001	0,001	0,001	0,001	nvt	nvt
200	177	PE	Kleiss	0,001	0,001	0,001	0,001	nvt	nvt

De geteste blazen hebben de volgende kenmerken:

Juva / MDS B500 D1(P3) - Ø 60-80 mm - testdatum 22-02-17 /04

Rendo/ MDS B500 D2(P3) - Ø 80-120 mm - testdatum 02-03-19 /28

Juva / MDS B500 D3(P3) - Ø 120-170 mm - testdatum 21-02-17 /13

Liander / MDS B500 D4(P3) - Ø 140-215 mm - testdatum 09-03-05

Tabel 4 Gemeten lekdebieten aan reeds in gebruik genomen blazen van de firma Ipco

Diameter uitwendig (mm)	Diameter inwendig (mm)	Materiaal	Fabrikant v.d. blaas	Lekdebiet aardgas (m ³ /h)		Lekdebiet waterstof (m ³ /h)		Verhouding waterstof / ag	
				100 mbar	200 mbar	100 mbar	200 mbar	100 mbar	200 mbar
63	59	PVC	Ipco	0,036	0,053	0,078	0,140	2,2	2,6
63	56	PE	Ipco	0,053	0,092	0,092	0,176	1,7	1,9
110	104	PVC	Ipco	0,032	0,058	0,050	0,096	1,6	1,7
110	90	PE	Ipco	0,032	0,065	0,055	0,099	1,7	1,5
160	152	PVC	Ipco	0,091	0,153	0,210	0,419	2,3	2,7
160	142	PE	Ipco	0,109	0,173	0,244	0,463	2,2	2,7
200	190	PVC	Ipco	0,051	0,102	0,082	0,174	1,6	1,7
200	177	PE	Ipco	0,095	0,159	0,134	0,295	1,4	1,9

De geteste blazen hebben de volgende kenmerken:

Liander / 210730.03 - 50 mm - inw.dia 50-60 mm - date in use 5-2-21

Enexis / 204532.88 - 100 mm - inw. dia 100-108 mm - date in use 8-2020

Stedin / 150 - 23 feb 2019

Nieuw geleverd / 10-225314.02 - 200mm - inw. dia. 190-209 mm (er is een nieuwe blaas getest aangezien de twee aangeleverde blazen niet op druk te krijgen waren).

De DN 150 blaas van de firma Ipco betrof een (oude) blaas zonder Gastec QA keurmerk. Deze meting toont aan dat de blazen zonder Gastec QA niet geschikt zijn voor toepassing met waterstof.

Bij de blaas 100mm wijkt de geteste inwendige diameter bij PE (90 mm) af van de opgave van Ipco (100-108mm).

Bij de blaas 200mm wijkt de geteste inwendige diameter bij PE (177 mm) af van de opgave van Ipco (190-209 mm).

Deelconclusies

- Alle geteste blazen van Kleiss zijn lekdicht, zowel met aardgas als met waterstof.
- Alle geteste blazen van Ipco vertonen een zeker lek, zowel bij aardgas als bij waterstof.
- Bij de Ipco-blazen is het lek bij de PE-buizen iets groter dan bij de PVC-buizen met dezelfde diameter.
- Bij de Ipco-blazen is het lek bij waterstof bij de leiding DN 150 en DN 200 groter dan de grenswaarde zoals gesteld in KE 214.
- Verouderde Ipco-blazen, zonder Gastec QA keurmerk, zijn niet geschikt voor toepassing met waterstof.
- Voor het merendeel van de metingen geldt dat bij de Ipco-blazen de verhouding lekkage waterstof/aardgas groter wordt bij een hogere druk (200 mbar vergeleken met 100 mbar).

4.2 Maximaal debiet waarbij concentratie < 10% LEL

De beproevingen in 4.2 hebben als doel om vast te stellen welk lekdebiet maximaal acceptabel is bij de toepassing van gasblazen in een waterstofnet om zodoende nog veilig te kunnen werken in een werkput. Bij het zoeken naar het debiet waarbij de concentratie gas in de werkput < 10% LEL is, zijn de metingen uitgevoerd zoals opgenomen in tabel 5. Er is gestart met een aardgasdebiet van 0,25 m³/h, verdeeld over twee blazen. Dit is een kwart van de maximale aardgasdebiet dat voortvloeit uit de minimale dichtheidseis in KE 194 (twee blazen met elk een lek van 0,463m³/h aardgas). Omdat de gasconcentraties tijdens de metingen per meetpunt erg fluctueerden (van 40% LEL naar 0% LEL) en de verschillen tussen de meetpunten groot waren, is gekozen om bij vier verschillende aardgasdebieten te meten in de range van 25 tot 100% van het maximaal toelaatbaar lek van 2 blazen.

Bij de metingen van waterstoflekkages is ervoor gekozen om drie waterstofdebieten te kiezen die ongeveer gelijk zijn aan de aardgasdebieten die zijn gehanteerd bij de metingen met aardgaslekkages (meting 5, 6 en 7). Tevens is een waterstofdebiet van 1,81 m³/h gekozen. Dat debiet is twee maal zo groot als het aardgasdebiet in meting 4. Bij een gelijkblijvende lekopening is immers het lekdebiet waterstof ongeveer 2 keer zo groot als bij aardgas.

Tijdens de uitvoering van de meetseries 1 tot en met 8 bleek dat de maximale concentraties fors lager waren bij het openen van de helft van één zijkant van de tent. Om ook metingen te verrichten met enige ventilatie van de werkput, zijn er ook twee meetseries uitgevoerd (9 en 10) zonder toepassing van een tent. In praktijk zal bij dit soort werkzaamheden geen tent over de werkput worden geplaatst. De testomstandigheden zonder tent kunnen nog steeds als worst case worden opgevat aangezien het nagenoeg windstil was.

Tabel 5 Weergave van gemeten maxima bij verschillende omstandigheden

Serie	Medium	Lekdebiet totaal	Lekdebiet per blaas	Tent dicht – maxima % LEL *			1 zijkant half open – maxima % LEL
				(m3/h)	(m3/h)	Meting 1	Meting 2
1	Aardgas	0,25	0,12	32	28	30	35
2	Aardgas	0,60	0,30	46	46	48	44
3	Aardgas	0,11	0,06	22	16	18	8
4	Aardgas	0,91	0,45	54	52	54	46
5	Waterstof	0,24	0,12	20	26	24	8
6	Waterstof	0,59	0,29	50	50	50	20
7	Waterstof	0,98	0,49	66	58	62	54
8	Waterstof	1,81	0,90	100	100	100	50
9	Waterstof	0,29	0,15	Zonder tent; op 2 middelste meetpunten schommeling % LEL tussen 2 en 15%. Bij 7% van deze meetwaarden is er sprake van een concentratie > 10% LEL.			
10	Aardgas	0,15	0,07	Zonder tent; op 2 middelste meetpunten schommeling % LEL tussen 2 en 15%. Bij 3% van deze meetwaarden is er sprake van een concentratie > 10% LEL.			
10% LEL is 0,59% aardgas 10% LEL is 0,40% waterstof							
Toelichting series 1 t/m 8 - afscherming door een tent Per serie een drietal metingen van ieder 6 minuten. Een nieuwe meting binnen een serie is opgestart (openen gastoevoer) nadat concentraties bij alle meetpunten tot nul waren gedaald. Aan eind van de serie tevens een meting met een zijkant v.d. tent half open (boven) en toevoer van gas.							
Toelichting Serie 9 en 10 - zonder tent Een serie betrof een meting van in totaal 30 minuten (iedere 10 seconden een concentratie-meting)							
Gedurende alle meetseries was de windkracht stil tot zeer zwak							
*De hoogste tien gemeten waarden liggen in de buurt van dit getal. Voor de grafische weergave per serie zie Bijlage IV							

Deze metingen zijn per serie grafisch weergegeven in Bijlage IV..

Bij het beoordelen van de grafieken zoals opgenomen in Bijlage IV valt op dat de buitenste meetpunten in de ring van de werkput (Figuur 1) in geval van waterstof veelal een lagere concentratie weergeven in vergelijking met een gelijk debiet aardgas. Om dit inzichtelijk te maken is Tabel 23 opgenomen met daarin een weergave van het totaal aantal meetwaarden én het aantal meetwaarden gelijk aan 0% LEL, > 0% LEL en > 10% LEL. Waarbij onderscheid is gemaakt tussen meetpunten in de ring (alle meetpunten behalve B2 en C2 in Foto 14Foto 1) en middelste meetpunten (B2 en C2 in Foto 14).

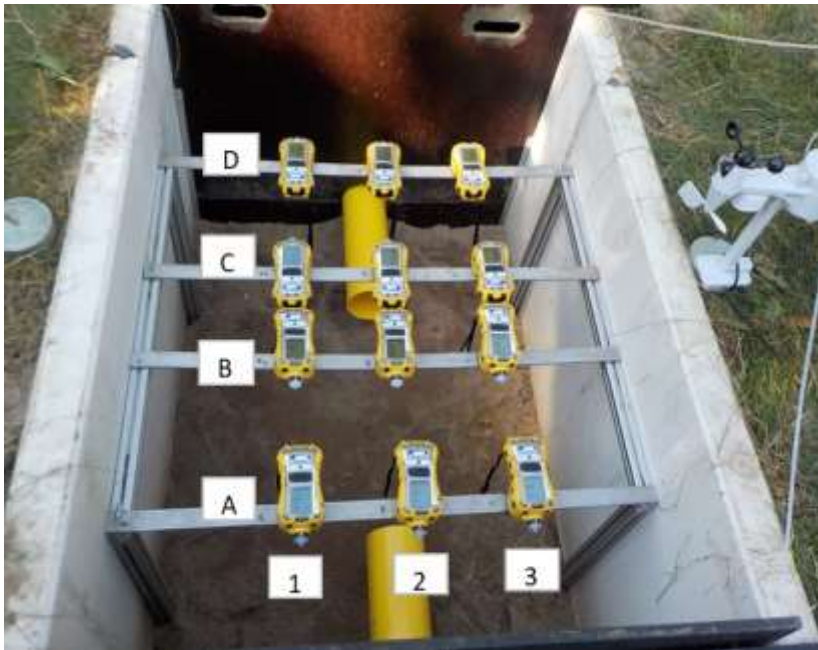


Foto 14 Verdeling en codering van de 12 meetpunten in de werkput

Bij een vergelijkbaar debiet is het percentage van het aantal meetpunten met een meetwaarde in de buitenste ring van de werkput dat de 10% LEL waarde overstijgt bij aardgas groter in vergelijking met waterstof. In tabel 6 is dit gevisualiseerd door de verdeling van het aantal meetpunten binnen een bepaald concentratiebereik in kleur weer te geven. Daarmee is eenvoudig te zien dat waterstof zich meer concentreert in het midden van de werkput dan aardgas, en aardgas zich meer verspreidt over het oppervlak van de werkput.

In Bijlage IV staat een tabel met de onderliggende data. Daarin is ook te zien dat het percentage van de meetpunten > 10% LEL in de buitenring van de werkput bij aardgas groter is dan bij waterstof.

Tabel 6 Verdeling concentraties in de werkpunt op basis van aantal meetwaarden per concentratiebereik

Aardgas, met tent	Waterstof, met tent	Aardgas, resp. waterstof, zonder tent																																				
<table border="1"> <tr><td>1%</td><td>1%</td><td>1%</td></tr> <tr><td>5%</td><td>14%</td><td>5%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>7%</td><td>5%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>0%</td><td>0%</td></tr> </table> <p>0,11 m³/h</p>	1%	1%	1%	5%	14%	5%	1%	7%	5%	1%	0%	0%	<table border="1"> <tr><td>0%</td><td>3%</td><td>4%</td></tr> <tr><td>10%</td><td>29%</td><td>15%</td></tr> <tr><td>5%</td><td>17%</td><td>6%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>2%</td><td>1%</td></tr> </table> <p>0,24 m³/h</p>	0%	3%	4%	10%	29%	15%	5%	17%	6%	1%	2%	1%	<table border="1"> <tr><td>1%</td><td>1%</td><td>4%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>3%</td><td>1%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>3%</td><td>0%</td></tr> <tr><td>0%</td><td>0%</td><td>0%</td></tr> </table> <p>Aardgas 0,15 m³/h</p>	1%	1%	4%	1%	3%	1%	1%	3%	0%	0%	0%	0%
1%	1%	1%																																				
5%	14%	5%																																				
1%	7%	5%																																				
1%	0%	0%																																				
0%	3%	4%																																				
10%	29%	15%																																				
5%	17%	6%																																				
1%	2%	1%																																				
1%	1%	4%																																				
1%	3%	1%																																				
1%	3%	0%																																				
0%	0%	0%																																				
<table border="1"> <tr><td>51%</td><td>13%</td><td>6%</td></tr> <tr><td>29%</td><td>54%</td><td>26%</td></tr> <tr><td>26%</td><td>48%</td><td>26%</td></tr> <tr><td>11%</td><td>15%</td><td>3%</td></tr> </table> <p>0,25 m³/h</p>	51%	13%	6%	29%	54%	26%	26%	48%	26%	11%	15%	3%	<table border="1"> <tr><td><></td><td>1%</td><td>3%</td></tr> <tr><td>3%</td><td>59%</td><td>17%</td></tr> <tr><td>5%</td><td>49%</td><td>6%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>0%</td><td>1%</td></tr> </table> <p>0,59 m³/h</p>	<>	1%	3%	3%	59%	17%	5%	49%	6%	1%	0%	1%	<table border="1"> <tr><td>0%</td><td>1%</td><td>0%</td></tr> <tr><td>2%</td><td>17%</td><td>1%</td></tr> <tr><td>1%</td><td>13%</td><td>1%</td></tr> <tr><td>0%</td><td>1%</td><td>0%</td></tr> </table> <p>Waterstof 0,29 m³/h</p>	0%	1%	0%	2%	17%	1%	1%	13%	1%	0%	1%	0%
51%	13%	6%																																				
29%	54%	26%																																				
26%	48%	26%																																				
11%	15%	3%																																				
<>	1%	3%																																				
3%	59%	17%																																				
5%	49%	6%																																				
1%	0%	1%																																				
0%	1%	0%																																				
2%	17%	1%																																				
1%	13%	1%																																				
0%	1%	0%																																				
<table border="1"> <tr><td>23%</td><td>28%</td><td>27%</td></tr> <tr><td>42%</td><td>57%</td><td>44%</td></tr> <tr><td>33%</td><td>53%</td><td>37%</td></tr> <tr><td>11%</td><td>17%</td><td>7%</td></tr> </table> <p>0,60 m³/h. Met tent.</p>	23%	28%	27%	42%	57%	44%	33%	53%	37%	11%	17%	7%	<table border="1"> <tr><td><></td><td>4%</td><td>3%</td></tr> <tr><td>13%</td><td>78%</td><td>26%</td></tr> <tr><td>6%</td><td>71%</td><td>13%</td></tr> <tr><td>0%</td><td>1%</td><td>0%</td></tr> </table> <p>0,98 m³/h</p>	<>	4%	3%	13%	78%	26%	6%	71%	13%	0%	1%	0%	<p>LEGENDA</p> <table border="1"> <tr><td></td><td>< 5% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL</td></tr> <tr><td></td><td>5-25% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL</td></tr> <tr><td></td><td>25-50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL</td></tr> <tr><td></td><td>>50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL</td></tr> <tr><td></td><td>Geen data</td></tr> </table>		< 5% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL		5-25% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL		25-50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL		>50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL		Geen data		
23%	28%	27%																																				
42%	57%	44%																																				
33%	53%	37%																																				
11%	17%	7%																																				
<>	4%	3%																																				
13%	78%	26%																																				
6%	71%	13%																																				
0%	1%	0%																																				
	< 5% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL																																					
	5-25% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL																																					
	25-50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL																																					
	>50% van de meetwaarden is groter dan 10% LEL																																					
	Geen data																																					
<table border="1"> <tr><td>7%</td><td>13%</td><td>18%</td></tr> <tr><td>20%</td><td>49%</td><td>33%</td></tr> <tr><td>25%</td><td>34%</td><td>33%</td></tr> <tr><td>5%</td><td>10%</td><td>9%</td></tr> </table> <p>0,91 m³/h</p>	7%	13%	18%	20%	49%	33%	25%	34%	33%	5%	10%	9%	<table border="1"> <tr><td><></td><td>0%</td><td>7%</td></tr> <tr><td>3%</td><td>76%</td><td>27%</td></tr> <tr><td>5%</td><td>53%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>0%</td><td>1%</td><td>0%</td></tr> </table> <p>1,81 m³/h</p>	<>	0%	7%	3%	76%	27%	5%	53%	25%	0%	1%	0%													
7%	13%	18%																																				
20%	49%	33%																																				
25%	34%	33%																																				
5%	10%	9%																																				
<>	0%	7%																																				
3%	76%	27%																																				
5%	53%	25%																																				
0%	1%	0%																																				

Deelconclusies

- De hoogste concentraties worden gemeten in het midden van de werkput.
- Aardgas verspreidt zich meer over de gehele werkput in vergelijking met waterstof. Met andere woorden: waterstof concentreert zich meer in het midden van de werkput.
- Bij een aardgaslekdebiet van 0,15 m³/h kunnen er concentraties ontstaan > 10% LEL³.
- Bij een waterstoflekdebiet van 0,29 m³/h kunnen er concentraties ontstaan > 10% LEL⁴

4.3 Directe ontsteking bij een waterstof- of aardgaslek

De beproevingen in 4.3 hebben als doel om vast te stellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij een directe ontsteking van lekgas nabij de uitstroomopening.

4.3.1 Directe ontsteking aardgas - 1 meter

De meting is tweemaal uitgevoerd met een aardgasdebiet van 0,15 m³_n/h waarbij de toevoer van aardgas via de blazenlans plaatsvond. De ontsteking van het aardgas was niet hoorbaar. Maar bij deze twee beide metingen ontstond enkele minuten na de toevoer van gas een luide knal: de gasblaas bleek te zijn geknapt. Kort daarop is de gastoevoer gestopt. De gastoevoer is niet gestopt na de ontsteking van het aardgas maar na het knappen van de blazen.

Bij de tweede meting is het aardgas twee keer ontstoken. (zie Bijlage VI). Bij de tweede keer ontsteken is de blaas geknapt.

Tabel 7 Directe ontsteking aardgas met blaas op 1 m afstand

	Meting 1	Meting 2
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	0,15	0,15
Max concentratie aardgas (vol%) bij de uitstroomopening	1,0 *	100 *
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	324	174 (twee keer ontstoken)
Geluid - LAF max – (dBa)	114,5	115,0
Druk nabij blaas (max) – (bar)	- **	- **
Omgevingstemperatuur (°C)	17,4	14,9
Windsnelheid (m/s)	0,5	0,4
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	De blaas knapt	De blaas knapt
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Geen ontsteking zichtbaar	Geen ontsteking zichtbaar
Conditie blaas na uitnemen	Blaas is gescheurd, er is een gat zichtbaar. Er is smeltschade zichtbaar bij de lanskoppeling.	Blaas is gescheurd, er is een gat is zichtbaar. Er is smeltschade zichtbaar bij de lanskoppeling.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Nee	Nee
*De concentratie wordt om de 10 seconden opgeslagen. De continue aanwezige ontstekingsbron (vonken) verklaren het verschil tussen de gemeten waarden.		
**Bij deze metingen was een drukmeting niet mogelijk. De snel reagerende drukmeter kan slechts 10 seconden loggen en moet daarna opnieuw geactiveerd worden. Het moment van de knal kon daardoor niet worden vastgelegd.		

³ 100% LEL = 5,9% Gronings aardgas

⁴ 100% LEL = 4,0% Waterstof

Deelconclusie:

Bij directe ontsteking van een onderbroken aardgasleiding, waarbij de blaas op ca 1 m afstand van de onderbreking zat, zijn de blazen stuk gegaan als gevolg van het ontbranden van lekgasstroom. Hierbij was de lekstroom gericht op de blaas.

De conclusie is dat bij ontsteking van aardgas dat langs een blaas lekt die is geplaatst op korte afstand (ca 1 m) vanaf de leidingonderbreking, deze blaas zal knappen als gevolg van de blijvend aanwezige vlam.

4.3.2 Directe ontsteking waterstof – 1 meter

De metingen zijn tweemaal uitgevoerd met een waterstofdebiet van 0,45 m³_n/h waarbij de toevoer van waterstof via de blazenlans plaatsvond. De ontsteking van het waterstof was bij deze twee metingen goed hoorbaar. Bij de eerste meting vond ontsteking plaats ongeveer 20 seconden na de toevoer van waterstof; bij de tweede meting was dat ongeveer 15 seconden na het openen van de waterstoftoevoer. Na de hoorbare ontstekingen is de gastoevoer gestopt. De gasblazen bleken daarna beide nog intact.

Tabel 8 Directe ontsteking waterstof met blaas op 1 m afstand

	Meting 3	Meting 4
Medium	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	0,45	0,45
Max concentratie waterstof (%) bij de uitstroomopening	86*	14*
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	33	128
Geluid - LAF max – (dBa)	-	-
Druk nabij blaas (max) – (bar)	..**	..**
Omgevingstemperatuur (°C)	14,2	14,0
Windsnelheid (m/s)	0,3	0,4
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Hoorbare ontsteking (beperkt geluid)	Hoorbare ontsteking (beperkt geluid)
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Hoorbare ontsteking (beperkt geluid)	Hoorbare ontsteking (beperkt geluid)
Conditie blaas na uitnemen	Enige smeltschade bij de lanskoppeling	Geen afwijkingen
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Ja	Ja
*De concentratie wordt om de 10 seconden opgeslagen. De continue aanwezige ontstekingsbron (vonken) verklaren het verschil tussen de gemeten waarden.		
**Bij deze metingen was een drukmeting niet mogelijk. De snel reagerende drukmeter kan slechts 10 seconden loggen en moet daarna opnieuw geactiveerd worden. Het moment van de knal kon daardoor niet worden vastgelegd.		

Deelconclusie:

Bij directe ontsteking van een onderbroken waterstofleiding, waarbij de blaas op ca 1 m afstand van de onderbreking zat, vond een hoorbare ontsteking van de lekgasstroom plaats. Vanwege dit verschijnsel is de waterstoftoevoer gestopt, waardoor ook het verbrandingsproces stopte. Als de toevoer (de lekkage) in stand was gebleven dan had de blaas net als bij aardgas ook kunnen knappen. Dit laatste is gebaseerd op de waargenomen smeltschade na één van deze metingen.

4.3.3 Directe ontsteking aardgas – 20 meter

De meting is twee keer uitgevoerd met een debiet van 0,20 m³_n/h met de toevoer van aardgas op 30 cm afstand van de blaas. Bij de eerste meting is na 15 minuten nog geen concentratieverhoging nabij de uitstroomopening waarneembaar. Om deze reden is een extra meetpunt aangebracht voor het meten van de gasconcentratie in de buis (in de buis, op een afstand van 0,6 meter vanaf de uitstroomopening). Bij deze meting zijn er na 18 minuten na het openen van de gastoevoer in totaal acht stijgingen en acht daaropvolgende plotselinge dalingen van concentraties ter plaatse van het meetpunt in de buis waargenomen (zie grafiek in Bijlage VII, data meetserie 6).

Bij de twee metingen zijn geen ontstekingen waargenomen (geen geluid of vlam). Om eventuele ontsteking visueel te kunnen waarnemen is er een papieren lint nabij de uitstroomopening aangebracht (bij zowel metingnr. 5 als metingnr. 6). Deze bleek gedurende meting 6 deels te verbranden. Bij de temperatuurmeting (zie Bijlage VI, meting 6) is zichtbaar dat het gas in de leiding meerdere keren is ontstoken.

Aan het eind van meting 6 (looptijd 60 minuten) was de leiding over een lengte van 5 meter vanaf de uitstroomopening voelbaar opgewarmd.

Tabel 9 Directe ontsteking aardgas met blaas op 20 m afstand

	Meting 5	Meting 6
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	0,20	0,20
Max concentratie aardgas (%) - uitstroomopening	0	5
Max concentratie aardgas (%) – bovenin de buis op 0,6m vanaf uitstroomopening	-	24
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 20	81
Geluid - LAF max – (dBa)	90,1	84,3
Druk nabij blaas (max) – (bar)	- **	- **
Omgevingstemperatuur (°C)	12,0	15,2
Windsnelheid (m/s)	0,3	0,3
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Geen bijzonderheden	Geen bijzonderheden
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Geen bijzonderheden	Papiertje beweegt af en toe en brandt langzaam weg
Conditie blaas na uitnemen	Uitgenomen na meting 2	Geen afwijking.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Uitgenomen na meting 2	Ja
**Bij deze metingen was een drukmeting niet mogelijk. De snel reagerende drukmeter kan slechts 10 seconden loggen en moet daarna opnieuw geactiveerd worden. Het moment van de knal kon daardoor niet worden vastgelegd.		

Deelconclusies:

Op basis van de concentratiestijgingen en plotselinge dalingen van gasconcentraties en verbranding van de papieren strook bij de uitstroomopening wordt geconcludeerd dat er rustige ontsteking in de buis heeft plaats gevonden. Doordat een constante ontstekingsbron aanwezig was, is het aardgas in de buis tot achtmaal toe ontstoken. Een enkele ontsteking bleek niet in staat om het lekkende aardgas blijvend te laten branden. De blazen worden niet aangetast.

De conclusie is dat bij ontsteking van aardgaslekstroom van ca. 0,2 m³_n/h langs een blaas lekt die is

geplaatst op grotere afstand (ca. 20 m) vanaf de leidingonderbreking, deze blaas intact zal blijven doordat het verbrandingsproces in de leiding zichzelf niet in stand houdt.

4.3.4 Directe ontsteking waterstof – 20 meter

De meting is drie keer uitgevoerd met een debiet van 0,60 m³_n/h met de toevoer van gas op 30 cm afstand van de blaas. Bij de eerste meting is er na 15 minuten flink geroffel hoorbaar. Bij de twee volgende metingen vond de, goed hoorbare, ontsteking plaats na ongeveer 10 minuten. De leiding is aan de buitenkant niet voelbaar warmer geworden. Bij de eerste meting is de blaas niet aangetast, bij de tweede en derde meting is de blaas wel stuk geraakt.

Tabel 10 Directe ontsteking waterstof met blaas op 20 m afstand

	Meting 7	Meting 21*	Meting 22*
Medium	Waterstof	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	20	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	0,60	0,60	0,60
Max concentratie waterstof (%) – uitstroomopening	7	1	3 met piek aan eind van 11
Max concentratie waterstof (%) – bovenin de buis op 0,6m vanaf uitstroomopening	>100% LEL	>100%LEL	>100% LEL
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	270	85	-
Geluid - LAF max – (dBa)	131,3	129,2	133,2
Druk nabij blaas (max) – (bar)	- **	-**	3,4
Omgevingstemperatuur (°C)	14,5	13,2	14,7
Windsnelheid (m/s)	0,0	0,3	0,3
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Heftige ontsteking waargenomen	Heftige ontsteking waargenomen	Heftige ontsteking waargenomen, blaas schiet uit de buis
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Heftige ontsteking waargenomen	Heftige ontsteking waargenomen	Heftige ontsteking waargenomen, blaas schiet uit de buis
Conditie blaas na uitnemen	Geen afwijking	De aansluitkoppeling op de bal is losgeraakt van de aansluitleiding	De ballon is losgeraakt van de aansluiting
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Ja	Nee	Nee
*Meting 21 en 22 hebben op een andere dag plaats gevonden dan meting 7.			
**Bij deze metingen was een drukmeting niet mogelijk. De snel reagerende drukmeter kan slechts 10 seconden loggen en moet daarna opnieuw geactiveerd worden. Het moment van de knal kon daardoor niet worden vastgelegd.			

Deelconclusies:

Bij een relatief klein waterstoflek (0,6 m³_n/h) nabij een gasblaas op een afstand van 20 meter van de leidingonderbreking én de aanwezigheid van een ontsteekbron, vond een heftige ontsteking plaats waardoor de blaas defect raakte. De conclusie is dat voor een waterstofleiding de huidige blazen niet

geschikt zijn als afdichtingsmiddel voor situaties waarbij de blaas op een grote afstand is geplaatst van de uitstroomopening.

Nb de blazen zoals gebruikt in de test blijken nagenoeg lekdicht te zijn. De toegepaste lekkage van 0,6 m³/h komt dus niet overeen met de waargenomen lekkages van de betreffende blazen. In de praktijk zijn lekkages niet uit te sluiten door vervuiling of beschadigingen in de buis. Daarnaast zal er na het stoppen van een ongecontroleerde gasuitstroming, nog enige tijd sprake zijn van gas dat in de leiding achter blijft. Hierbij zal er op een moment sprake zijn van een gas/luchtmengsel in de leiding zoals bij deze beproeving gecreëerd.

4.4 Vertraagde ontsteking van een waterstof- of aardgaslek

De beproevingen in 4.4 hebben als doel om vast te stellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij een ontsteking in de werkput.

4.4.1 Vertraagde ontsteking aardgas - 1 meter

Deze metingen zijn zesmaal uitgevoerd waarbij de ontsteking werd geactiveerd zodra bij één van de vier meetpunten in de werkput een concentratie werd bereikt van respectievelijk 5%, 10% en 15% aardgas in lucht (let wel; op een afstand van 0,5 meter hoger dan de bovenkant van de buis). Per concentratie zijn twee metingen gedaan. De gemeten concentraties zijn opgenomen in Bijlage VII en de gemeten temperaturen bij de blaas in Bijlage VI.

De ontsteking van het vrijkomende gas verloopt rustig. Nadat het gas is ontstoken, werd de toevoer gestopt. Het gas uit de leiding brandt vervolgens bij alle zes metingen rustig weg.

Tabel 11 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 1 meter afstand, concentratie aardgas > 5%.

Richtwaarde 5%	Meting 9	Meting 10
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	3	4
Max. conc. aardgas in de werkput (%)	9 (vrij plotselinge stijging)	7
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	59	149
Geluid - LAF max – (dBa)	88,6	73,7
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	< 0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	15,0	17,0
Windsnelheid (m/s)	0,2	0,3
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 10.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 14.	Beoordeling na meting 14.

Bij de volgende twee metingen heeft de ontsteking plaatsgevonden nadat voor het eerst een concentratie > 10% aardgas is waargenomen. Ten opzichte van de vorige metingen is de vlam in werkput, logischerwijs, duidelijk groter. De temperatuur zoals waargenomen bij de blaas is ook fors hoger geworden waarbij de temperatuur langzamer oploopt (zie Bijlage VI, meting 11 en 12). De temperatuurstijging is minder snel in vergelijking met metingen 9 en 10. De blaas is heel gebleven.

Tabel 12 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 1 meter afstand, concentratie aardgas > 10%.

Richtwaarde 10%	Meting 11	Meting 12
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	7	7
Max conc. aardgas in de werkput (%)	13,9	12,3
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	230	349
Geluid - LAF max – (dBa)	98,8	83,8
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	< 0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	16,4	16,0
Windsnelheid (m/s)	0,3	0,3
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 12.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 14.	Beoordeling na meting 14.

Bij de volgende twee metingen heeft de ontsteking plaats gevonden nadat voor het eerst een concentratie > 15% aardgas is waargenomen. De temperatuur zoals waargenomen bij de blaas is bij één van deze metingen ook fors hoger geworden (zie bijlage VI, meting 14). De blaas is heel gebleven.

Tabel 13 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 1 meter afstand, concentratie aardgas > 15%.

Richtwaarde 15%	Meting 13	Meting 14
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	7	7,5
Max conc. aardgas in de werkput (%)	13,5	18,2
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	85	480
Geluid - LAF max – (dBa)	-	87,7
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	< 0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	18,7	16,8
Windsnelheid (m/s)	0,3	0,1
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 14.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 14.	Ja

Deelconclusie:

De blaas die op ca. 1 m van de leidingonderbreking wordt geplaatst zal niet bezwijken als gevolg van een vertraagde ontsteking van een groot debiet aardgas dat uit de onderbroken leiding stroomt.

4.4.2 Vertraagde ontsteking waterstof – 1 meter

Oorspronkelijk was de gedachte om waterstofconcentraties in de werkput te creëren van respectievelijk 5, 10, 20, 30, 50 en 80%. Met de gebruikte MFC met als maximum debiet 15,5 m³/h waterstof bleek de maximaal haalbare concentratie in de werkput 12% te zijn. De haalbare concentratie is sterk afhankelijk van de wind. Tijdens de metingen was het nagenoeg windstil, als de wind iets aantrok, daalde de concentratie waterstof erg snel.⁵

De gemeten temperaturen nabij de blaas zijn opgenomen in Bijlage VI en de gemeten concentraties zijn opgenomen in Bijlage VII.

De ontsteking van het vrijkomende waterstof verliep krachtig. Nadat het waterstof is ontstoken, werd de toevoer gestopt. Het waterstof uit de leiding brandde snel op.

⁵ NB. Op een later moment toen, nadat de proeven die in deze paragraaf zijn beschreven, reeds waren uitgevoerd, is in de testinstallatie een gasmeter ingebouwd met een grotere capaciteit. Bij 36 m³/h werd een concentratie van 20% bereikt. Bij de beproevingen zoals beschreven in 4.5 (doven van een gasbrand) is een debiet van 80m³/h toegevoerd. Dit leidde tot concentraties tot 55%.

Tabel 14 Vertraagde ontsteking waterstof met een blaas op 1 meter afstand, concentratie waterstof ca. 5%.

Richtwaarde 5%	Meting 15	Meting 16
Medium	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	4	4
Max conc. waterstof in de werkput (%)	4	6
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	168	147
Geluid - LAF max – (dBa)	-	91,6
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	< 0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	14,4	14,5
Windsnelheid (m/s)	0,0	0,0
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Hoorbaar en zichtbaar	Geen beelden
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Korte, krachtige ontsteking.	Geen beelden
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 16.	Geen afwijking
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 20.	Beoordeling na meting 20.

Tabel 15 Vertraagde ontsteking waterstof met een blaas op 1 meter afstand, concentratie waterstof ca. 10%.

Richtwaarde 10%	Meting 17	Meting 18	Meting 20
Medium	Waterstof	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	1	1	1
Debiet (m ³ _n /h)	8	8	15,5
Max conc. waterstof in de werkput (%)	9	8	12
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	156	172	126
Geluid - LAF max – (dBa)	97,8	97,9	95,8
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	14,5	14,3	13,9
Windsnelheid (m/s)	0,1	0,1	0,1
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Hoorbaar, niet zichtbaar.	Hoorbaar en zichtbaar.	Hoorbaar en zichtbaar.
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Korte, krachtige ontsteking.	Korte, krachtige ontsteking.	Korte, krachtige ontsteking.
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 20.	Beoordeling na meting 20.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 20.	Beoordeling na meting 20.	ja

Het verhogen van de flow om zodoende een hogere concentratie in de werkput te verkrijgen heeft in het kader van deze opdracht geen meerwaarde. Bij een waterstofdebiet groter dan 15 m³/h is de snelheid in deze leiding > 0,2 m/s. De concentratie waterstof in de leiding is dan 100% [5] Bij deze

snelheden is er geen sprake van vlaminslag en zal de blaas niet aangetast worden. De explosiekracht in de werkput zal uiteraard wel groter zijn.

Deelconclusie:

De blaas die op ca 1 m van de leidingonderbreking in een waterstofleiding wordt geplaatst, zal niet bezwijken als gevolg van een vertraagde ontsteking van een groot debiet waterstof dat uit een onderbroken leiding stroomt.

4.4.3 Vertraagde ontsteking aardgas – 20 meter

Bij dit onderdeel zijn 10 metingen uitgevoerd waarbij de bedoeling was om de ontsteking te activeren zodra bij één van de vier meetpunten in de werkput een concentratie werd bereikt van respectievelijk 5%, 10% en 15% aardgas in lucht (let wel; op een afstand van 0,5 meter hoger dan de bovenkant van de buis).

Bij de metingen met richtwaarden voor de gasconcentratie in de werkput van respectievelijk 5% en 15%, bleek het gas na de eerste meting (nr. 28 respectievelijk nr. 34) door te blijven branden na het stoppen van de gastoevoer (op enige afstand). Er kon blijkbaar nog voldoende zuurstof toetreden in de leiding om de vlam in stand te houden. Zodra de nieuwe meting (nr. 29 respectievelijk nr. 35) werd gestart door het openen van de gastoevoer, trad de vlam uit de leiding.

De gemeten temperaturen nabij de blaas zijn opgenomen in Bijlage VI en de gemeten gasconcentraties zijn opgenomen in Bijlage VII.

Tabel 16 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 20 meter afstand, concentratie aardgas > 5%.

Richtwaarde 5%	Meting 28	Meting 29	Meting 30	Meting 31
Medium	Aardgas	Aardgas	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	20	20	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	4	4	4	4
Max conc. aardgas in de werkput (%)	4,5	5	5	5
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 20	< 20	< 20	< 20 (twee kleine stijgingen)
Geluid - LAF max – (dBa)	Maximum waarden tijdens alle vier de metingen was 82,3			
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,07	Geen data	Geen data	Geen data
Omgevingstemperatuur (°C)	17,0	16,8	17,2	17,3
Windsnelheid (m/s)	0,1	0,1	0,1	0,1
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.*	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.*	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.*	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.*	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 31.	Beoordeling na meting 31.	Beoordeling na meting 31.	Geen afwijkingen
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 31.	Beoordeling na meting 31.	Beoordeling na meting 31.	Ja

*Bij meting 29 en 30 zonder het toevoegen van een vonk ineens een vlam zichtbaar. Kennelijk bleef het aardgas langzaam branden in de buis (vanaf de voorgaande meting). Zie ook warmtebeelden in bijlage VIII. Na meting 30 was de vlam in de buis wel gedoofd.

Tabel 17 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 20 meter afstand, concentratie aardgas > 10%.

Richtwaarde 10%	Meting 32	Meting 33
Medium	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	7	7
Max conc. aardgas in de werkput (%)	14,4	9,1
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 20	27 (duidelijke piek)
Geluid - LAF max – (dBa)	75,2	79,9
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	<0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	16,4	16,4
Windsnelheid (m/s)	0,1	0,1
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas.
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 33.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 33.	Ja.

Tabel 18 Vertraagde ontsteking aardgas met een blaas op 20 meter afstand, concentratie aardgas > 15%.

Richtwaarde 15%	Meting 34	Meting 35	Meting 36	Meting 37
Medium	Aardgas	Aardgas	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	20	20	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	8	8	8	8
Max conc. aardgas in de werkput (%)	15,6	0	0	0
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 20	< 20	< 20	< 20
Geluid - LAF max – (dBa)	-	Maximum waarden tijdens alle vier metingen is 89,2		
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,02	-	-	-
Omgevingstemperatuur (°C)	15,9	16,1	16,1	17,0
Windsnelheid (m/s)	0,0	0,0	0,0	0,1
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Binnen 30 seconden na openen toevoer brand in de put*	Binnen 10 seconden na openen toevoer brand in de put*	Binnen 10 seconden na openen toevoer brand in de put*
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas	Binnen 30 seconden na openen toevoer brand in de put	Binnen 10 seconden na openen toevoer brand in de put	Binnen 10 seconden na openen toevoer brand in de put
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 37.	Beoordeling na meting 37.	Beoordeling na meting 37.	Geen afwijkingen
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 37.	Beoordeling na meting 37.	Beoordeling na meting 37.	Ja
*Bij meting 35, 36 en 37 zonder het toevoegen van een vonk ineens een vlam zichtbaar. Kennelijk bleef het aardgas langzaam branden in de buis (vanaf de voorgaande meting). Feitelijk zijn dit geen vertraagde ontstekingen geweest.				

Deelconclusie:

De blaas die op grotere afstand (ca 20 m) van de leidingonderbreking wordt geplaatst zal niet bezwijken als gevolg van een vertraagde ontsteking van een groot debiet aardgas dat uit de onderbroken leiding stroomt.

4.4.4 Vertraagde ontsteking waterstof – 20 meter

Deze metingen zijn viermaal uitgevoerd waarbij de ontsteking is geactiveerd zodra bij één van de vier meetpunten in de werkput een concentratie werd bereikt van respectievelijk 5% en 10% waterstof in lucht (let wel; op een afstand van 0,5 meter hoger dan de bovenkant van de buis). Per concentratie zijn er twee metingen gedaan.

De ontsteking van het vrijkomende waterstof verloopt rustig. Nadat het waterstof is ontstoken, werd de toevoer gestopt.

De gemeten gasconcentraties zijn opgenomen in Bijlage VII.

Tabel 19 Vertraagde ontsteking waterstof met een blaas op 20 meter afstand, concentratie waterstof > 5%.

Richtwaarde 5%	Meting 24	Meting 25
Medium	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	6	6
Max conc. waterstof in de werkput (%)	5	5
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 30	< 30
Geluid - LAF max – (dBa)	97,3	91,0
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,04	< 0,04
Omgevingstemperatuur (°C)	16,3	16,1
Windsnelheid (m/s)	0,2	0,2
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Eerst zichtbare, rustige, ontsteking. Nadat kraan is gesloten een krachtig vervolg van de verbranding.	Vrijwel direct een krachtige ontsteking. Nadat de kraan gesloten is geen extra effect.
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Eerst zichtbare, rustige, ontsteking. Nadat kraan is gesloten een krachtig vervolg van de verbranding.	Vrijwel direct een krachtige ontsteking. Nadat de kraan gesloten is geen extra effect.
Conditie blaas na uitnemen	Geen afwijkingen	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 27.	Beoordeling na meting 27.

Tabel 20 Vertraagde ontsteking waterstof met een blaas op 20 meter afstand, concentratie waterstof > 10%.

Richtwaarde 10%	Meting 26	Meting 27
Medium	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	15	15
Max conc. waterstof in de werkput (%)	10	10
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	< 30	< 30
Geluid - LAF max – (dBa)	-	93,2
Druk nabij blaas (max) – (bar)	< 0,04	< 0,04
Omgevingstemperatuur (°C)	16,3	16,1
Windsnelheid (m/s)	0,2	0,3
Waarnemingen videobeelden buiten de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking.	Zichtbare, rustige, ontsteking.
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Krachtige ontsteking.	Krachtige ontsteking.
Conditie blaas na uitnemen	Geen afwijkingen	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 27.	Ja

Deelconclusie:

De blaas die op grotere afstand (ca 20 m) van de leidingonderbreking in een waterstofleiding wordt geplaatst, zal niet bezwijken als gevolg van een vertraagde ontsteking van een relatief groot debiet waterstof dat uit de onderbroken leiding stroomt.

4.5 Plaatsing van een blaas nadat waterstof of aardgas is ontstoken

De beproevingen in 4.5 hebben als doel om vast te stellen hoe een gasblaas zich gedraagt bij het doven van een gasbrand als gevolg van ontstoken vrij uitstromend gas.

4.5.1 Plaatsing blaas bij brand van vrij uitstromend aardgas

De meting is driemaal uitgevoerd waarbij het uit de leiding stromende gas met een gasbrander, geplaatst op de bodem van de werkput, is ontstoken. Er is niet gekozen voor een vonkontsteker omdat deze mogelijk bij de eerste meting al zou verbranden.

Tabel 21 Plaatsing blaas in een brandende aardgasleiding

	Meting 40	Meting 41	Meting 42
Medium	Aardgas	Aardgas	Aardgas
Lengte buis (m)	20	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	24	23	23
Max conc. aardgas in de werkput (%)	-	-	-
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	<20	<20	<20
Geluid - LAF max – (dBa)	89,0	90,6	90,6
Druk nabij blaas (max) – (bar)	<0,02	<0,02	<0,02
Omgevingstemperatuur (°C)	16,7	18,5	21,8
Windsnelheid (m/s)	0,7	0,7	0,7
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas. Vlam dooft rustig tijdens het zetten van de blaas.	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas. Vlam dooft rustig tijdens het zetten van de blaas.	Zichtbare, rustige, ontsteking van het aardgas. Vlam dooft rustig tijdens het zetten van de blaas.
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 42.	Beoordeling na meting 37.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 42.	Beoordeling na meting 37.	Ja.

Deelconclusie

Een brandende aardgasleiding kan probleemloos met een blaas worden afgesloten. NB. Dit geldt op voorwaarde dat de blaas niet lekt.

4.5.2 Plaatsing blaas bij brand van vrij uitstromend waterstof

De meting is viermaal uitgevoerd waarbij het uitstromend waterstof bij de eerste meting met een gasbrander, geplaatst op de bodem van de werkput, is ontstoken. Bij de eerste meting werd de gasbrander na ontsteking uitgeblazen en trad vlaminslag op in de waterstofleiding. Daarna volgde uitstroming van onverbrand waterstof. Vervolgens is de waterstoftoevoer dichtgezet.

Daarna is er een vonkontsteker aangebracht aan de bovenzijde van de buis. Deze is gebruikt bij de hiernavolgende 3 metingen.

Tabel 22 Plaatsing blaas in een brandende waterstofleiding

	Meting 43	Meting 44	Meting 45	Meting 46
Medium	Waterstof	Waterstof	Waterstof	Waterstof
Lengte buis (m)	20	20	20	20
Debiet (m ³ _n /h)	80	80	84	80
Max conc. waterstof 0,5 vanaf de rand in werkput (%)	55	53	45	40
Temperatuur bij de blaas (max) – (°C)	<20	<20	<20	<20
Geluid - LAF max – (dBa)	Maximum tijdens beide metingen is 123,1		122,4	120,8
Druk nabij blaas (max) – (bar)	0,29	0,05	0,04	0,04
Omgevingstemperatuur (°C)	20,3	21,0	19,3	19,0
Windsnelheid (m/s)	0,9	0,8	0,9	0,3
Waarnemingen videobeelden in de werkput	Eerst een krachtige ontsteking van het waterstof in de werkput, vervolgens vlaminslag gevolgd door uitstroom van onverbrand waterstof.	Krachtige ontsteking (vonk aangebracht na enige tijd uitstromen van waterstof). De vlam dooft rustig na het zetten van de blaas. Na enkele minuten ontsteekt er nog een beetje waterstof.	Krachtige ontsteking (vonk aangebracht na enige tijd uitstromen van waterstof). De vlam dooft rustig na het zetten van de blaas. Na enkele minuten ontsteekt er nog twee keer een beetje waterstof.	Krachtige ontsteking (vonk aangebracht na enige tijd uitstromen van waterstof). De vlam dooft rustig na het zetten van de blaas. Na enkele minuten ontsteekt er nog een beetje waterstof.
Conditie blaas na uitnemen	Beoordeling na meting 46.	Beoordeling na meting 46.	Beoordeling na meting 46.	Geen afwijkingen.
Blaas 3 minuten op druk te houden (ja/nee)	Beoordeling na meting 46.	Beoordeling na meting 46.	Beoordeling na meting 46.	Ja.
Bij de metingen 43, 44 en 45 gaven de PBM's zoals gebruikt door de onderzoekers op een afstand van 20 meter van de werkput een alarmering dat de concentratie waterstof > 10% LEL was.				

Deelconclusie

Een brandende waterstofleiding kan probleemloos met een blaas worden afgesloten. NB. Dit geldt op voorwaarde dat de blaas niet lekt.

NB. Er is getest met een debiet van 80m³/h, dit komt overeen met ongeveer 1 m/s. De stroomsnelheid zal bij een daadwerkelijke lekkage vele malen groter zijn. In dit onderzoek is het effect van het stoppen van het brandend waterstof onderzocht. Als in praktijk de gasuitstroming met een blaas wordt gestopt dan zal de snelheid dalen en uiteindelijk ook de uitstroomsnelheid van 1 m/s bereiken, waarbij het verder oppompen van de blaas de uitstroomsnelheid nog verder verlaagt. In dit onderzoek is beoordeeld of mogelijke vlaminslag van negatieve invloed is op de werking van de blaas. Vlaminslag zal optreden bij lagere uitstroomsnelheden van het gas.

In een waterstofnet zal de stroomsnelheid mogelijk drie keer hoger zijn in vergelijking met de stroomsnelheid in een aardgasnet. Of een blaas bij deze snelheden is te plaatsen zal nader onderzocht moeten worden. De verwachting is dat dit mogelijk is omdat bij een gelijke weerstand (de groter wordende blaas) er ongeveer drie keer zoveel waterstof kan passeren in vergelijking met aardgas.

5. Mitigerende maatregelen

Op basis van de uitgevoerde metingen is met name bij een “kleine” lekkage waterstof (< 0,6 m³_n/h) ter plaatse van een gasblaas een aantasting van de blaas mogelijk indien een ontstekingsbron in de werkput aanwezig is. De blaas zou kunnen verbranden (in geval van een blaas op ca. 1 meter afstand van de uitstroomopening) of de blaas zou kunnen knappen (in geval van een blaas op 20 meter afstand van de uitstroomopening).

Maatregelen die de kans aantasting van de blaas moeten verkleinen zullen zich richten op het voorkomen van;

- Een gaslek
- Het vormen van een brandbaar mengsel
- Een ontsteking

Op basis van de uitgevoerde literatuurstudie en de bij de netbeheerders opgehaalde informatie, lijken de huidige maatregelen bij toepassing van blazen in het aardgas distributienet niet tot verbranding van de blaas te leiden. **Huidige** maatregelen zijn;

1. Controle op dichtheid van de blaas vooraf.
2. Controle op dichtheid van de blaas na plaatsing.
3. Voorkomen van ontsteking in de werkput door afzetten werkput, geen gereedschap gebruiken dat vonken genereert en gebruik van antistatische kleding.
4. Meten van de gasconcentratie in de werkput. Indien een persoon aanwezig is in de werkput, dan gebeurt dit m.b.v. de gasdetector van die persoon.

Bij de toepassing van blazen bij waterstof worden de volgende **aanvullende** maatregelen voorgesteld:

Voor blazen die op een afstand van **ongeveer 1 meter** van het buiseind wordt geplaatst:

1. Het geforceerd ventileren van de werkput.
2. Meten van de gasconcentratie bij het buiseind (bovenin de buis)
3. Nadat de blazen zijn gezet en het leidingdeel waaraan werkzaamheden zijn gepland drukloos is gemaakt, het betreffende deel ontgassen door te spoelen met stikstof.

Bij het plaatsen van een blaas op een afstand van 1 meter van het buiseind in een waterstofnet is de verwachting dat de huidige maatregelen voldoende zijn om een veilige toepassing te borgen. Met name bij proefprojecten is het zinvol om de voorgestelde aanvullende maatregelen te overwegen en/of te valideren.

Voor blazen die op een afstand **groter dan 1 meter** van het buiseind wordt geplaatst:

1. Toepassen van een type blaas met stevigere constructie dan degene zoals deze is getest⁶. Dit vergt een toepassing van een ander type blaas dan wel een modificatie van het huidige type die door de fabrikant zou moeten worden gerealiseerd.
2. Toepassen van een dubbele blaas met ontgassing tussen de blazen (block & bleed)
3. Toepassen van een enkele blaas met een ventilatie-afvoer achter de blaas (air-moven)
4. Het geforceerd ventileren van de werkput.

⁶ De geteste blaas blijkt weliswaar nagenoeg volledig lekdicht te zijn, enige lekkage in de praktijk is niet uit te sluiten door vervuiling of beschadiging van de leiding. Daarnaast zal er bij het stoppen van een vrije gasuitstroming door het zetten van een blaas altijd gas in de afgedichte leiding aanwezig zijn. Dit gas stroomt langzaam uit de leiding waarbij lucht in de leiding stroomt. Gedurende langere tijd zal een brandbaar gas/luchtmengsel in de leiding aanwezig zijn. Bij waterstof is de periode nu eenmaal langer in vergelijking met aardgas door de ruimere brandbaarheidsgrenzen van Waterstof. Bij een onverhoopte ontsteking is de impact bij waterstof groter gebleken in vergelijking met aardgas.

5. Meten van de gasconcentratie bij het buiseind (bovenin de buis)
6. Nadat een enkele blaas of dubbele blaas is gezet, het deel tussen de blaas en de uitstroomopening ontgassen door te spoelen met stikstof.

De genoemde maatregelen kunnen onafhankelijk van elkaar worden toegepast, met dien verstande dat door toepassen van air-moven (maatregel 3) ook de werkput extra zal worden geventileerd (maatregel 4) door toetreding van lucht in de onderbroken buis. Het nadeel van de maatregelen 3 en 4 is dat de gasconcentratie waterstof weliswaar zal afnemen, maar dat er over een bepaalde periode een brandbaar mengsel ontstaat. Gezien de ruimere brandbaarheidsgrenzen voor waterstof is die periode bij waterstof langer dan bij een vergelijkbare situatie voor aardgas.

6. Conclusies

6.1 Beantwoording van de onderzoeksvragen

Op basis van het uitgevoerde theoretische en praktisch onderzoek zijn de onderzoeksvragen als volgt te beantwoorden.

- **Zijn de gasblazen zoals ze nu worden toegepast in een aardgasdistributienet geschikt voor de toepassing in een waterstofdistributienet?**

Gasblazen zijn geschikt bij het plaatsen op een afstand van 1 meter vanaf een uitstroomopening (bij reguliere werkzaamheden). Een klein aardgaslek en een klein waterstoflek nabij de blaas bleken te kunnen worden ontstoken. Hierdoor kan de blaas stuk gaan; dit was bij het aardgaslek ook in beide metingen het geval. Dit soort falen heeft zich tot nu toe in de praktijk slechts beperkt voorgedaan. Het voorkomen van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen in de werkput is en blijft echter een belangrijk punt om dit falen bij aardgas én bij waterstof te voorkomen. Daarnaast kunnen er aanvullende maatregelen worden getroffen om de risico's bij de toepassing met waterstof verder te verlagen.

Bij incidentbestrijding worden gasblazen op een afstand van ca. 20 meter vanaf een uitstroomopening geplaatst. Voor deze toepassing in waterstofnetten, zijn de huidige blazen niet geschikt, zonder dat er aanvullende maatregelen worden getroffen. De krachtigere ontsteking van waterstof én de ruimere brandbaarheids grenzen van waterstof zorgen ervoor dat de kans op het bezwijken van een gasblaas groter is in vergelijking met aardgas.

Via de beantwoording van onderstaande **deelvragen** volgt een nadere toelichting

- **Wat zijn de lekdebieten van gasblazen zoals ze nu worden gebruikt in het aardgasnet als deze worden toegepast in een waterstofnet?**

De gasblazen zoals ze nu door de regionale netbeheerders worden toegepast zijn ofwel van het fabricaat Kleiss ofwel van het fabricaat Ipco. De blazen van Kleiss worden in grotere mate toegepast dan de blazen van Ipco.

Beide fabricaten blazen zijn voor wat betreft de toepassing op aardgas voorzien van het Gastec QA keurmerk, gebaseerd op KE 194. Het lekdebiet van een blaas volgens deze Keuringseisen moet kleiner zijn dan 0,3 m³/h (getest met lucht, bij een druk van 100 en 200 mbar). Als 0,3 m³/h getest met lucht als acceptabele grens wordt gehanteerd, dan zou dat overeenkomen met een lekdebiet van 0,6 m³/h waterstof.

De geteste, reeds gebruikte, blazen van Kleiss blijken in kunststof leidingen volledig afdichtend te zijn voor waterstof; het lekdebiet is 0,001 m³/h.

Bij de geteste blazen van Ipco zijn bij een druk van 200 mbar, de volgende lekdebieten waterstof in een PE-leiding gemeten:

DN 60	0,176 m ³ /h (gebruikte blaas)
DN 100	0,099 m ³ /h (gebruikte blaas)
DN 150	0,463 m ³ /h (verouderd type blaas, zonder Gastec QA-keurmerk)
DN 200	0,295 m ³ /h (nieuwe, niet gebruikte, blaas)

- **Hoe moeten werkprocedures worden aangepast?**

De werkprocedures gerelateerd aan het zetten van blazen in geval van reguliere werkzaamheden (uitbreiding, vervanging, verhelpen van beperkte lekkages zoals aan het licht zijn gekomen bij lekzoekrondes) hoeven niet specifiek te worden aangepast voor de situatie van toepassing van

waterstof. Hierbij is het uitgangspunt dat een gasblaas op een korte afstand (ca. 1 meter) van de werklocatie wordt geplaatst.

Bij het bestrijden van incidenten en de inzet van blazen zijn wel aanpassingen van werkprocedures gewenst. Zie hiervoor de mitigerende maatregelen in Hoofdstuk 5. De aanpassing van werkprocedures zal zich daardoor moeten richten op het uitbreiden met:

- Toepassen van een dubbele blaas ("block en bleed")
- Het eventueel ventileren van de leiding door middel van air-moven.
- Het eventueel geforceerd ventileren van de werkput.
- Het meten van de gasconcentratie bovenin de leiding nabij de uitstroomopening.
- De spoelprocedure van het ingeblokke leidingdeel.

- **Welke maximaal lekdebiet is acceptabel bij de toepassing van gasblazen in een waterstofnet, om zodoende nog veilig te kunnen werken in een werkput?**

In een werkput van 1,7 meter bij 1,2 meter met een diepte van 1 meter mag het lekdebiet waterstof maximaal $0,29 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ zijn bij aanwezigheid van twee uitstroomopeningen. Het maximaal lekdebiet per blaas is derhalve $0,146 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ waterstof. Dit is lager dan het lekdichtheids criterium zoals gesteld in KE 214 (2022). Deze noemt $0,1 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ op basis van lucht, dit geeft $0,2 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ gerelateerd aan waterstof. Het toelaatbare debiet in KE 214 zou derhalve moeten worden verlaagd naar $0,07 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$.

- **Hoe gedraagt een gasblaas zich in het geval van een nog net acceptabele gaslekkage over de gasblaas, bij een directe ontsteking(brand) van dit lekgas bij het buiseinde?**

Er hebben zich ongewenste situaties voorgedaan.

Bij directe ontsteking (nabij de uitstroomopening) van een "klein" lek kan de blaas bij zowel aardgas ($0,15 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$) als bij waterstof ($0,45 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$) stukbranden in geval van een blaas die is geplaatst op ca. 1 meter vanaf de uitstroomopening.

Bij directe ontsteking (nabij de uitstroomopening) van een "klein" waterstoflek ($0,6 \text{ m}^3/\text{h}$) kan de blaas bij waterstof stuk raken door krachtige ontstekingsverschijnselen, in geval van een blaas die is geplaatst op 20 meter vanaf de uitstroomopening.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de maximale waterstof lekkage volgens KE 214 $< 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ moet zijn én dat geteste Kleiss blazen bij de lekdichtheidsbeproevingen nagenoeg volledig lekdicht bleken te zijn. Het is echter niet uit te sluiten dat in praktijksituaties de lekgrens onverhoopt wordt overschreden door vervuilingen of beschadigingen in de leiding.

Als een vrije gasuitstroom wordt gestopt door het zetten van een blaas zal er gas (aardgas of waterstof) uit de leiding stromen. Na enig moment is dan een explosief mengsel in de leiding aanwezig. Bij waterstof is dat moment, door zijn ruimere brandbaarheids grenzen, groter in vergelijking met aardgas⁷.

⁷ In de rapportage HyDelta WP1C; toetreding van lucht in een waterstofleiding bij een leidingbreuk, is o.a vastgesteld dat er op 1 meter vanaf de uitstroomopening langdurig (>1,5 uur) een brandbaar mengsel in de leiding DN100 en DN200 aanwezig is. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het een leiding van 200 meter betrof die voorafgaande aan de meting volledig gevuld was met waterstof. Bij het zetten van een blaas op een afstand van 20 meter is de hoeveel weg te stromen waterstof een stuk kleiner.

- **Hoe gedraagt een gasblaas zich in het geval van een explosie in de werkput (verschillende gasconcentraties) ?**

Bij vertraagde ontstekingen bij verschillende gasconcentraties in de werkput zijn geen ongewenste gevolgen waargenomen. In vergelijking met aardgas is de ontsteking bij waterstof krachtiger. Bij aardgas brandt het gas langzaam uit de leiding waarbij de vlam zich terugtrekt in de buis. De temperatuur bij de blaas neemt wat toe. Maar de blaas wordt uiteindelijk niet aangetast. Bij deze metingen was er sprake van een grotere gasuitstroming om zodoende een hogere gasconcentratie in de werkput te verkrijgen. Door deze grotere gasuitstroming bevindt de vlam zich op grotere afstand van de blaas in vergelijking met de metingen met een kleine lekkage en een buislengte van 1 meter.

- **Hoe gedraagt een gasblaas zich (bij het stoppen van de gastoevoer) in geval van het doven van een gasbrand ter plaatse van het buiseind?**

Een gasblaas ondervindt geen nadelige gevolgen als de gastoevoer wordt gestopt door het oppompen van de blaas. De blaas is in staat een gasbrand (aardgas en waterstof) te laten doven, waarbij de blaas zijn functie na het doven blijft vervullen.

Nb

Bij het toegepaste lekdebiet waterstof (80m³/h) bleken de PBM's op een afstand van 20 meter van de werkput een alarmering te geven die aangaf dat 10% LEL werd overschreden. Dit was bij drie van de vier metingen aan de orde.

- **Welke ontstekingsscenario's zijn denkbaar bij het gebruik van gasblazen? (theoretisch onderzoek)**

Naast de bekende ontsteekscenario's bij aardgas, zoals open vuur en elektrische apparatuur, is bij waterstof de kans op ontsteking groter, omdat er bij hogere percentages gasluchtmengsels veel minder ontsteekenergie nodig is. Hierdoor ontstaat de kans op ontsteking door statische elektriciteit. Zeker in combinatie met het werken met kunststof buizen, waarbij de vonkvorming plaats kan vinden nabij het uiteinde van de buis. Indien er een gasluchtmengsel aanwezig is in de buis (bijvoorbeeld als gevolg van een lekkage), kan dit grote effecten hebben. Ook ontsteking door mechanische opgewekte vonken, door bijvoorbeeld graafwerkzaamheden of metaalbewerking, is een reëel scenario.

- **Welke aanvullende mitigerende maatregelen zijn denkbaar om ongewenste effecten van het ontsteken van waterstof te voorkomen? (theoretisch onderzoek)**

Zie hoofdstuk 5.

6.2 Onderling verband tussen de lekdichtheidsmetingen, concentratiemetingen en ontstekingsproeven.

Bij de beproeving van lekdichtheid van de bestaande blazen blijken de blazen van Kleiss voldoende lekdicht te zijn voor waterstof. De lekkage hierbij is nagenoeg nul. Van de blazen van Ipco, waarvan drie van de vier beoordeelde blazen reeds gebruikt waren, is de lekkage waterstof 0,10 tot 0,46 m³/h. Dit lekdebiet bij een blaas zal leiden tot concentraties waterstof hoger dan 10% LEL in een werkput van 1,7 bij 1,2 bij 1 meter. Dit blijkt uit de uitgevoerde concentratiemetingen zoals beschreven in dit rapport. Uit die metingen blijkt tevens dat bij een lekdebiet waterstof kleiner dan 0,98 m³/h (verdeeld over twee uitstroomopeningen), de concentratie lager blijft dan 100% LEL.

Een blaas met een kleine lekhoeveelheid waterstof (zoals 0,45 m³/h) geplaatst in een korte buislengte (1 meter), leidt bij een ontsteking in de werkput (1,7 bij 1,2 bij 1 meter) tot een blijvende vlam in de buis. Hierdoor kan de blaas stuk raken. Deze ontsteking zal alleen plaats kunnen vinden als de ontstekingsbron direct bij het buisuiteinde aanwezig is. Op een grotere afstand (> 50 cm) van de

uitstroomopening zal het lekkende gas dusdanig verdund zijn dat deze niet meer kan worden ontstoken.

Een blaas met een kleine lekhoeveelheid waterstof (zoals 0,60 m³/h) geplaatst op een grote afstand van de onderbreking van de leiding (20 meter, diameter DN 150), leidt bij een ontsteking tot een explosieve ontsteking. Bij deze explosieve ontsteking ontstaat een forse steekvlam in de werkput en is de kans groot dat de gasblaas losschiet als gevolg van de explosiedruk. Tijdens dit onderzoek is dat gebeurd bij twee van de drie metingen. Bij een leiding met een kleinere diameter zou ditzelfde lek (0,60 m³/h) tot een gas/luchtmengsel leiden met een hogere concentratie waterstof en daardoor anders reageren. Bij een leiding met een diameter kleiner dan DN 150 kunnen kleinere lekhoeveelheden waterstof (dus kleiner dan 0,60 m³/h) leiden tot gelijksoortige, krachtige, ontstekingen zoals waargenomen bij de DN 150 leiding. Daarnaast ondervindt het uittredende waterstof en de intredende lucht bij een leiding met een kleinere diameter (zoals DN 60 en DN 100) meer weerstand in vergelijking met een leiding met een grotere diameter (zoals DN 150).

Ingeval dat een blaas een grotere hoeveelheid waterstof lekt (4 tot 15 m³/h), dat vervolgens wordt ontstoken in de werkput, dan brandt het waterstof op het buisuiteinde. De ontsteking in de put is krachtig, maar op een afstand van 20 meter nauwelijks hoorbaar. De explosiedruk in de werkput heeft geen invloed op de blaas.

Als een groot debiet brandend waterstof (zoals 80 m³/h of groter) wordt gesmoord met een gasblaas, dan neemt de vlamgrootte op het buiseind af en brand het gas rustig weg in de buis. De waterstofvlam trekt zich langzaam terug in de buis. Enige tijd nadat de blaas is geplaatst is het waterstof grotendeels weggebrand en is de uitstroom aan rookgassen fors minder geworden. Lucht kan hierdoor makkelijker toetreden en zorgt voor een krachtige verbranding van het nog aanwezige waterstof. Een korte steekvlam is zichtbaar in de werkput.

7. Aanbevelingen

Op basis van het uitgevoerde onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan;

1. Het is raadzaam om deze rapportage onder de aandacht te brengen bij fabrikanten en leveranciers van tijdelijke afsluitmiddelen. Deze kunnen blaasconstructies ontwikkelen die beter bestand zijn tegen de ontsteking van een beperkt waterstoflek.
2. Het is raadzaam om deze rapportage onder de aandacht te brengen van het College van deskundigen Gastec QA. Dit met als doel de lekdichtheidscriteria nader te beschouwen. Zowel voor aardgas als voor waterstof.
3. Verder is het aan te bevelen om na te gaan wat de effecten zijn op gasblazen in geval van een directe ontsteking van waterstoflek, een vertraagde ontsteking van een waterstoflek en het doven van een gasbrand bij diameters anders dan 160 mm. Bij grotere diameters zijn de gevolgen mogelijk anders doordat er een grotere hoeveelheid explosief mengsel kan worden gevormd. Bij kleinere diameters zijn aanvullende maatregelen mogelijk niet nodig omdat de blaas stand houdt.
4. Bij dit onderzoek is het doven van een aardgasbrand en waterstofbrand onderzocht. De gebruikte blazen waren hierbij volledig lekdicht. Het doven van een brand met een enigszins lekkende blaas is niet onderzocht. Het kan zinvol zijn om dit alsnog te doen, om zodoende vast te stellen dat er geen ongewenste verschijnselen optreden.
5. Het is raadzaam om de ontstekingsproeven ook uit te voeren met de gasblazen van Ipco. Volgens de fabrikant zijn deze blazen van een dussdanige constructie waardoor ze beter bestand zijn tegen de krachtigere ontsteking van waterstof.
6. Nader onderzoek uit te voeren naar de effectiviteit van de in Hoofdstuk 5 voorgestelde mitigerende maatregelen. Zo zal bijvoorbeeld onderzocht moeten worden of een dubbele blaas bestand is tegen een onverhoopte ontsteking van het waterstof dat in de leiding aanwezig is nadat de vrije uitstroming van waterstof is gestopt.
7. Onderzoek wat de maximale stromingssnelheid bij de toepassing van waterstof is waarbij een gasblaas in een leiding is te plaatsen. Dit bij voorkeur bij meerdere diameters en met verschillende type blazen.
8. Overweeg bij de ombouw naar een waterstofnet de toepassing van afsluiters én gasblazen, waarbij de afsluiters ingezet worden voor het sectioneren van een net en de gasblazen voor het verkleinen van het werkgebied.
9. Nagaan wat de omvang van een gaswolk waterstof is in geval van een omvangrijke gaslekkage in een werkput⁸

⁸ In rapportage Kiwa GT-200096 zijn CFD berekeningen uitgevoerd voor aardgas en waterstof in het kader van affakkelen en afblazen. Hierbij is een maximaal debiet onderzocht van 300m³/h. Bij gaslekkages zullen deze debieten fors hoger zijn.

Referenties

- [1] Kiwa Technology, "Veilig Sectioneren van Waterstofnetten," 2021.
- [2] DVGW, "Hydrogen Research Projects," DVGW, Bonn, 2020.
- [3] DNV-GL, "Gedrag van waterstof bij lekkages in het gasdistributienet," 2020.
- [4] Kiwa Technology, "HyDelta D1C.2, dichtheid van distributieleidingen," 2021.
- [5] Kiwa Technology, "HyDelta D1C.1 Spoelen van aardgasleidingen met waterstof," 2021.
- [6] Bang et al, "Deflagration-to-detonation transition in pipes," in *Applied Mathematical Modelling*, 2019.
- [7] Federal Institute for Materials Research and Testing, "Explosion Processes and DDT of various flammable gas/air mixtures in long closed pipes containing obstacles," Berlin, 2008.
- [8] G.L. Oakley et al, "Investigations into concerns about BS EN 12874: 2001 flame arresters," 2004.

Bijlagen

I. Overzicht ongevallen database Kiwa Technology

Hieronder staan de incidenten beschreven die bekend zijn bij Kiwa Technology m.b.t. het falen van een gasblaas die hebben geleid tot een incident dat gemeld is conform de eisen van het SODM. Voor dit onderzoek zijn de meldingen meegenomen tussen 2003 en 2020.

28-9-2022: Bergen op Zoom, IJssellaan 43.

Lekke blaas \varnothing 315 PVC, spontaan opengescheurd, grote gasuitstroom tot gevolg. Gasstroom gestopt door op ruime afstand 3 blazen gelijktijdig te zetten. Hierbij is geen brand ontstaan. Incident is in onderzoek.

13-01-2020: Amsterdam, Prins Hendrikkade.⁹

Lekke gasblaas door opwarming van verkeerd geplaatste electrolasmof in een PE \varnothing 315mm. Hierbij is het **gas ontstoken** en is er een brand ontstaan. Ontstekingsbron is niet met zekerheid te zeggen, echter lijkt het aannemelijk dat dit is gekomen door een verkeerd geplaatste electrolasmof die op dat moment gelast werd. Door het wegsmelten van het PE zijn de gloeidraden van de mof vrij gekomen en heeft mogelijk geresulteerd in te hoge temperaturen in de buis.

04-09-2014 Amsterdam, Admiralengracht / Hoek F. v. Almondestraat,

Tijdens eigen werkzaamheden aan de hoofdleiding gas is een gasblaas geknapt met vrije gasuitstroom tot gevolg. De vrije gasuitstroom is gestopt door het zetten van een nieuwe gasblaas. Buistype Grijs gij, ND 250-400. Er heeft geen ontsteking plaatsgevonden.

2014, Lelystad, Kogge 8

Bij werkzaamheden aan een DN200 stalen leiding is een blaas gescheurd. Net ver van de blaas is met een brander de bekleding van de buis verwijderd, de blaas is hierdoor bezweken door de hitte. Hierbij is ook een brand ontstaan.

09-07-2012, Beverwijk, Belgiëlaan.

Uitkomst onderzoek geeft geen aanleiding tot slechte kwaliteit blaas, veroudering of slijtage. Meest aannemelijk is een scherp voorwerp/buisdeel als oorzaak. Eerste blaas raakt defect, tweede blaas raakt lek, maar door bijpompen kan gasstroom worden gestopt. DN 300 GGY, grote uitstroom $>40\text{m/s}$ $10.000\text{ m}^3/\text{h}$ aardgas. Er heeft geen ontsteking plaatsgevonden.

28-08-2012, Utrecht, Amsterdamsestraatweg

Door graafwerkzaamheden zeer grote uitstroom van gas. Gasblazen raken defect bij oppompen, een bak zand op de uitstroomopening zorgt voor lagere uitstroom waardoor wel een blaas geplaatst kan worden. DN400 GGY. Uitstroom $>30\text{m/s}$ en circa $14.000\text{m}^3/\text{h}$ aardgas. Er heeft geen ontsteking plaatsgevonden.

⁹ Deze melding is ook aangegeven via de vragenlijst die verzonden is aan de netbeheerders, zie Bijlage II

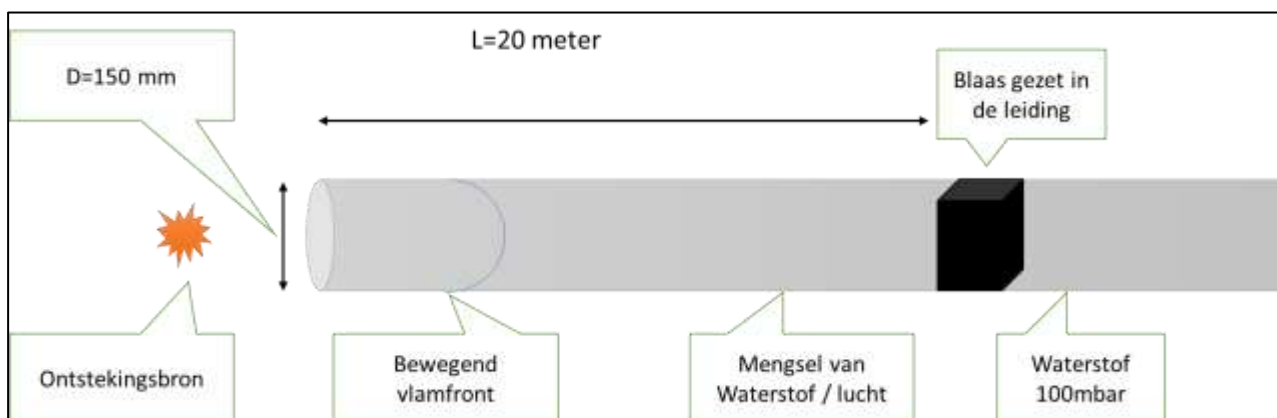
II. Ontvangen reacties netbeheerders

In de onderstaand overzicht staan alle vragen en bijbehorende antwoorden die teruggekomen zijn van de netbeheerders. Wat was de vermoedelijke reden dat de blaas niet goed functioneerde?	Verontreiniging en veel gebruikte blaas	Bij groot gaslek omgekapt door grote flow	Bij groot gaslek omgekapt door grote flow, tevens door omklappen in blaas gezaagd	Vuil op de bodem van de buis	Leeftijd van de blaas	Vuiligheid in de gasleiding	Hoogstwaarschijnlijk is er een klein beetje lekgas geweest langs de blaas die ontstoken is tijdens het afbranden van de bekleding van de stalen buis	Blaas losgekomen van inklemmingspunt	Blaas sloot niet goed af, door vuil en ruwe binnenkant	Door een verkeerd geplaatste electrolasmof is er een warmtebelasting ontstaan op de blaas die daardoor is geknapt	Het betrof een T1 blaas die geplaatst was in een 315 PVC voor een sterktebeproeving 1 bar, de vermoedelijke reden is dat deze blaas niet geschikt was voor deze druk	Kwaliteit van de blaas	Staalsplinter heeft voor beschadiging gezorgd	Blaas te vet waardoor er geen grip was op de buiswand, in combinatie met vochtige buiswand.	Blaas te vet waardoor er geen grip was op de buiswand, in combinatie met vochtige buiswand.
Was de blaas geknapt of was er sprake van gaslekage rondom de blaas?	Blaas geknapt	Blaas geknapt	Blaas geknapt	Blaas liep snel leeg	Blaas geknapt	Lekkage rondom blaas	Blaas geknapt door brand/smelten	Blaas losgekomen van inklemmingspunt	Lekkage rondom de buis	geknapt	Geknapt	Geknapt	geknapt	Losgeschoten	Losgeschoten
Wat was de (globale) datum?	2010	2005	2003	2023	2009	2015	2014	2022	2022	2020	2022	2007	2017	2022	2022
Om welk type/merk blaas ging het?	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	Kleiss	T1 blaas Kleiss	Witte blaas	Kleiss	Kleiss	Kleiss
Wat was het leidingmateriaal waarin de blaas werd gezet en welke diameter had deze leiding?	PVC 110 of 160	PVC 110	PVC-a 200	160mm PVC	200 sPVC	sPVC 110	219,3 Staal	sPVC 200	326 AC		PVC315	PVC	159ST	160/200	160/200
Wat waren de gevolgen van het niet goed functioneren van de blaas? (bijvoorbeeld vrije uitstroom van gas, wel/geen ontsteking, schade, persoonlijk letsel e.d.)	Het effect was minimaal de leiding was nog niet opengemaakt, de blaas knapte tijdens het zetten van de tweede blaas.	Het betreft hier een storing waarbij tijdens het aanbrengen van de filterbuizen voor bronbemaling de gasleiding werd beschadigd met als gevolg grote gasuitstroom. Door het knappen van de blaas kwam deze gasuitstroom weer op gang. Bijkomend risico hier was de locatie, een tankstation.	Het betreft een graafschade waarbij een buis ø200 nabij een district Station volledig getrokken met als gevolg grote gasuitstroom, de kant van het DS kon met een afsluiter worden gesloten de andere kant met een gasblaas. Na het knappen kwam de gasuitstroom weer op gang.	Doordat de blaas snel leeg liep geen uitstroom	niet veel, leiding nog niet doorgehaald	Geen gevolgen	Volledige uitstroom gas, geen persoonlijk letsel	Blaas is +/- 3 meter in de 200mm sPVC leiding geschoten. Er was een tijdelijk eindkap geplaatst	onbekend	Vrije gasuitstroom en brand	Door het knappen van de T1 blaas is vervolgens de MDS500 blaas geknapt, beide blazen zijn in de met lucht gevulde leiding gekomen.	Vrije uitstroom gas	Geen gevolgen	minimaal	minimaal
Hoe is het opgelost?	een nieuwe blaas gezet.	een nieuwe blaas gezet.	een nieuwe blaas gezet, inclusief 2e blaas	Bij de derde was de rotzooi in de buis zodanig verschoven dat we daar geen hinder meer van hadden.	reserve blaas geplaatst en oude blaas laten onderzoeken	Blaas 2x verplaatst, dus meerdere zadels moeten plaatsen	Eindkap plaatsen op leiding	Nieuw zadel en blaas geplaatst, vervolgens kapotte blaas verwijderd.	Op locatie verder weg nieuwe blazen gezet om probleem op te lossen		Drukloos gemaakt en met een camera in de leiding gekeken waar de blazen lagen	Kap geplaatst en nieuwe blaas gezet	Eindkap geplaatst	Is in onderzoek	Is in onderzoek
Zijn er nog andere opmerkingen?			in 2003 was de ontwikkeling van blaaslansen nog volop aan de gang, de voorziening die het terug klappen van een blaas voorkomt was er nog niet. Kort na 2003 kwam een tussenoplossing met een soort van schoenlepel en weer iets later werd teruggegrepen op een ouder ontwerp van een lans met een zijuitgang.	-											

III. Verwachte effecten bij vertraagde ontsteking

In het kader van dit HyDelta onderzoek wordt gekeken naar de mogelijke effecten van een lekkende blaas die in een waterstofleiding wordt geplaatst. Om dit te bepalen worden diverse scenario's en configuraties getest. Hier wordt ook gekeken naar het slechtste, doch denkbare, scenario. Om voor dit scenario de juiste veiligheidsmaatregelen en sensoren toe te passen is voorafgaande aan de metingen een beknopte literatuurstudie uitgevoerd.

In het scenario wat hier onderzocht wordt zullen de beste condities voor verbranding in lucht (een stoichiometrisch mengsel van 29.5% waterstof en 70.5% lucht) gecombineerd worden met een denkbaar scenario. Een uiteinde van deze pijpleiding is open (ter plaatse van een werkput, hier vinden bijvoorbeeld werkzaamheden plaats) en een uiteinde is gesloten (door de aangebrachte (lekkende) blaas), zie Figuur 6. Achter de blaas bevindt zich het distributienet met een druk van 100mbar.



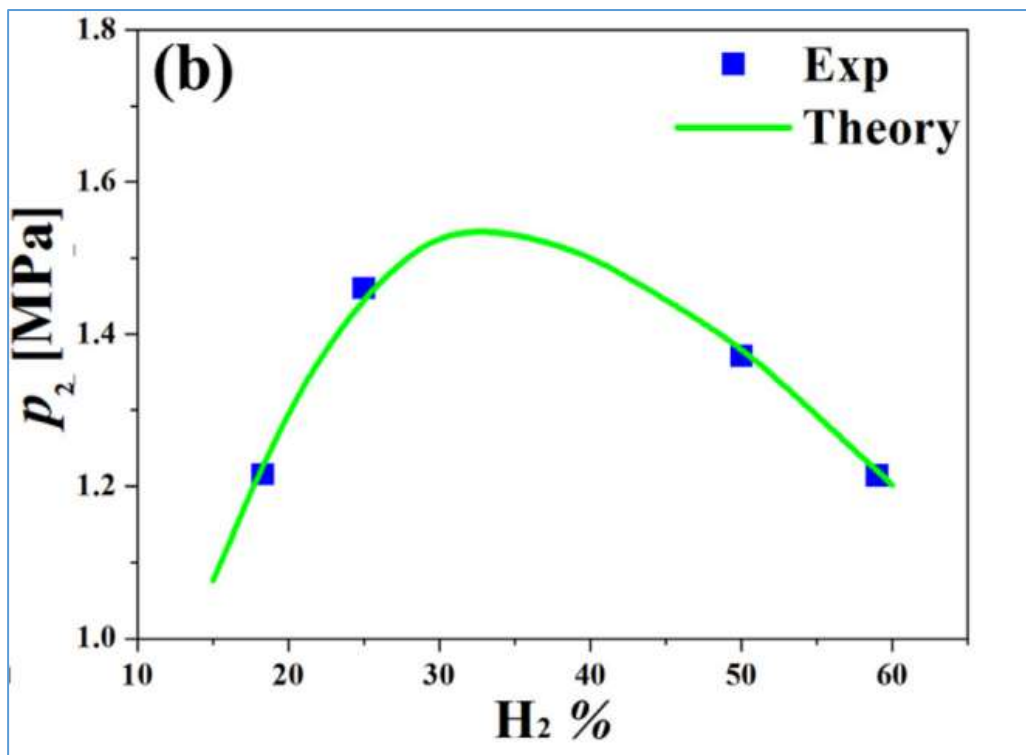
Figuur 6 : Schematische weergave van de situatie.

Er wordt vanuit gegaan dat er 20 meter leiding zit tussen de plek van de werkzaamheden en de blaas. Dit is een realistische waarde die bij werkzaamheden bij calamiteiten gehanteerd kan worden.

Wanneer de blaas een bepaalde hoeveelheid waterstof lekt zou het voor kunnen komen dat zich een mengsel van waterstof en lucht tussen de blaas en de werkzaamheden bevindt. Hoe dit waterstof zich zal verdelen in deze ruimte is voornamelijk onzeker. Omdat dit onzeker is, moet (in ieder geval voorafgaand aan het testen) worden aangenomen dat dit een goed gemengd homogeen mengsel is. Wanneer deze aannames gedaan zijn, ligt het in de lijn der verwachting dat bij een lengte van 20 meter leiding met 150 mm diameter, die is gevuld met een stoichiometrisch mengsel, detonatie optreedt. Detonatie houdt in dat het vlamfront van waterstof dusdanig versnelt dat deze gaat voortbewegen met de geluidssnelheid. Laminair brandt een stoichiometrisch waterstof mengsel rond de 2.5 m/s. Indien detonatie optreedt, kan de snelheid van het vlamfront oplopen tot ver boven de 1000 m/s. Deze versnelling wordt veroorzaakt door de geometrie (in dit geval een pijpleiding) in combinatie met toenemende turbulentie van het vlamfront en de expansie van de gassen tijdens verbranding. In de literatuur wordt de overgang van een verbranding (met een subsonische vlamsnelheid) naar een detonatie (met een (bijna) supersonische vlamsnelheid) "DDT" genoemd (Deflagration to Detonation). DDT kan in buisleidingen in sommige omstandigheden optreden vanaf ongeveer $L/D > 4$. [6]

Wanneer DDT optreedt wordt een maximale druk verwacht bij een lengte/diameterverhouding van ongeveer 50. De L/D in Figuur 1 is 133, hierbij zal ergens halverwege de drukpiek maximaal zijn, waarbij onzekerheid heerst hoe de druk zich na dit punt in de buis ontwikkelt. Gezien de snelheid van het vlamfront is te verwachten dat, nadat het vlamfront een bepaalde afstand heeft afgelegd, het vlamfront de rest van de buis inschiet. De drukpiek zal dan rond de 17 bar zijn. Gezien de snelheden is een snelle ($>100\text{kHz}$) drukmeter aan te raden om deze drukpiek te kunnen meten. De drukpiek van rond de 17 a 18 keer de startdruk komt ook in andere literatuur terug [7] [8]. Transiënte verschijnselen (overdriven detonation) kunnen er echter voor zorgen dat er drukpieken boven de 100 bar ontstaan [7] [8]. In [7] is een goed voorbeeld van experimenteel onderzoek van een 23 meter lange pijp van 0,159

m diameter met diverse brandstoffen. De buis is afgesloten en DDT werd verkregen met behulp van schotten. Extreme drukken werden gevonden (>100 bar) en sommige experimenten werden niet herhaald omdat de stalen pijp schade ondervond door de detonaties.



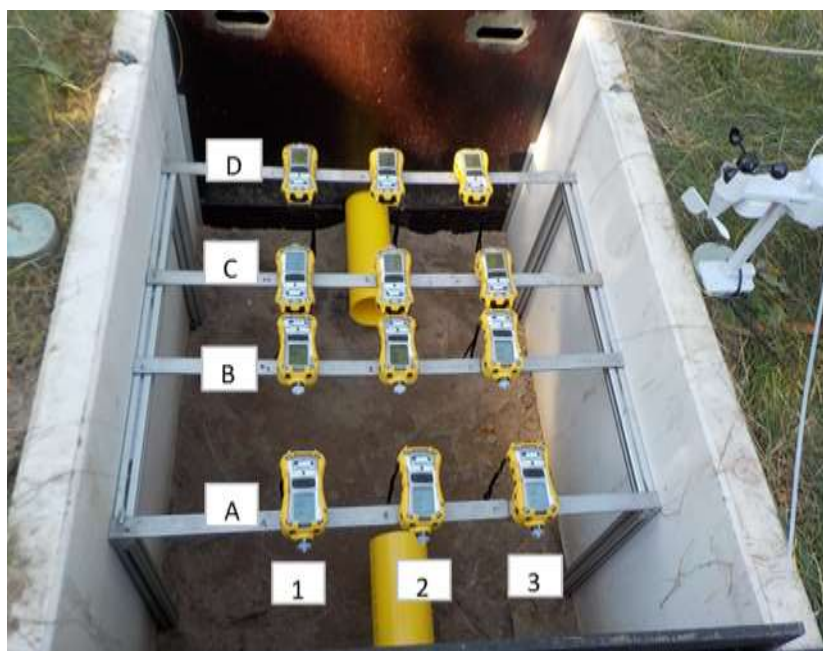
Figuur 7: de verwachte maximale drukpiek als functie van het mengsel [1].

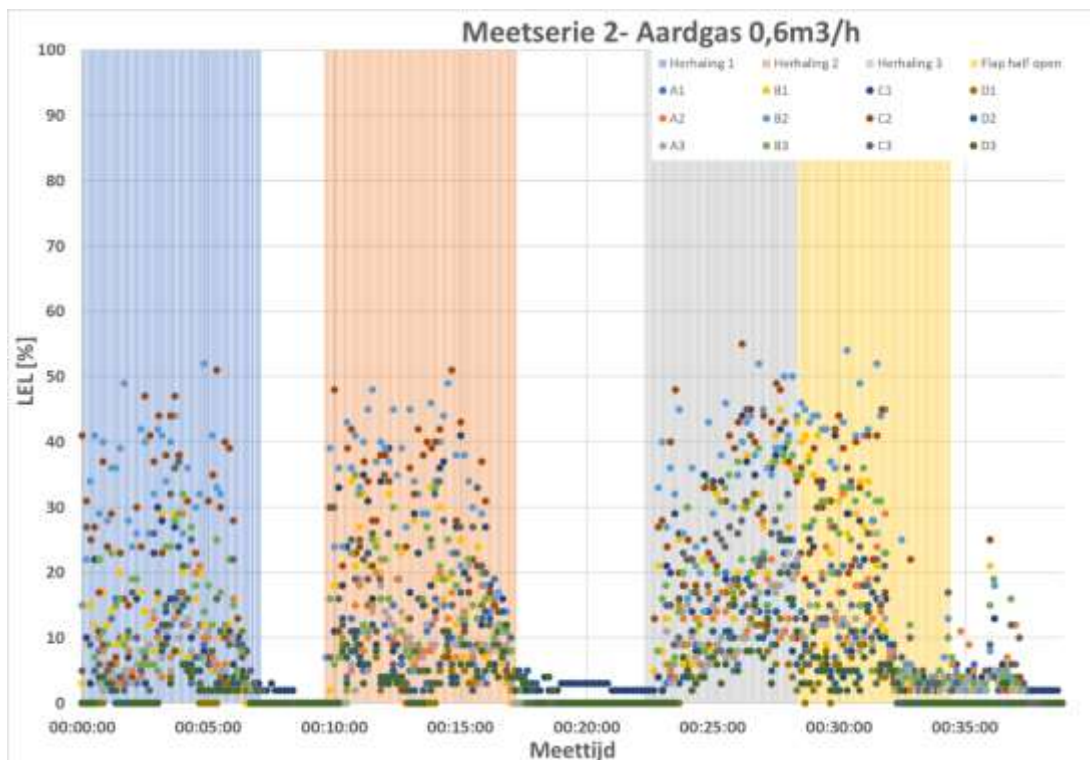
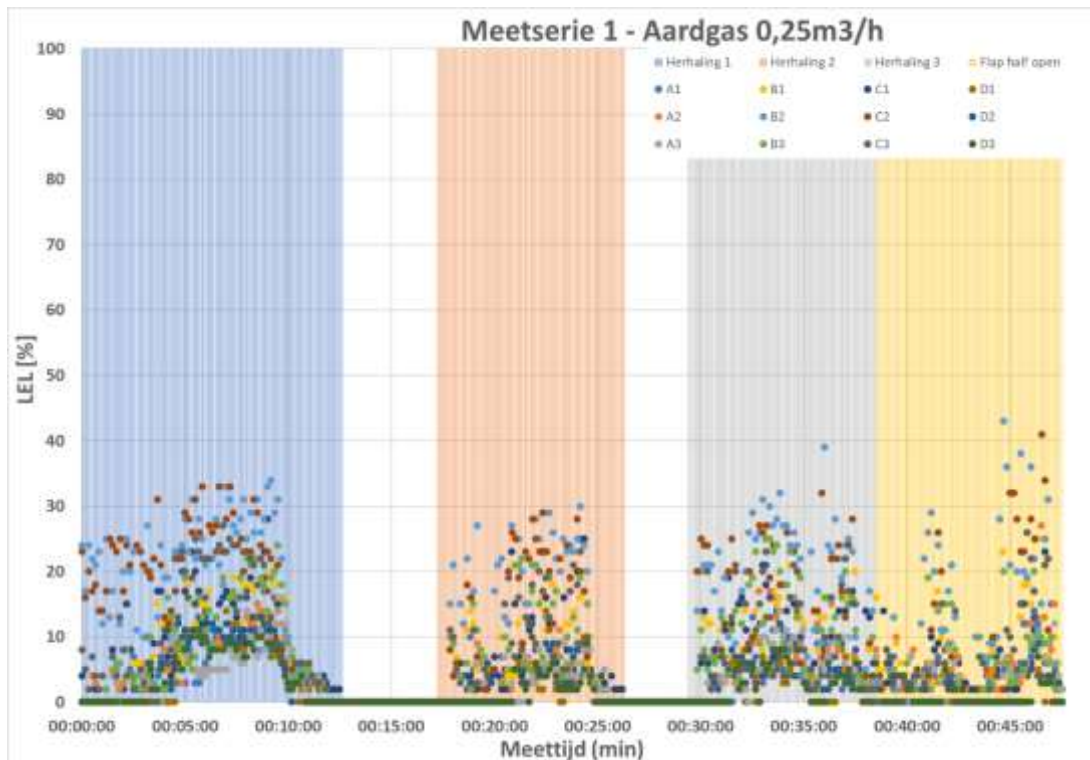
Overigens is het goed om te weten dat het optreden van DDT voornamelijk wordt bepaald door de oxidator en minder afhangt van de brandstof. H_2 en CH_4 gedragen zich dus ongeveer gelijk, met drukpieken in dezelfde orde. De kans dat DDT voorkomt bij aardgas is veel kleiner omdat de laminaire vlam snelheid van een stoichiometrisch mengsel bijna een factor 10 lager is dan dat deze is voor waterstof.

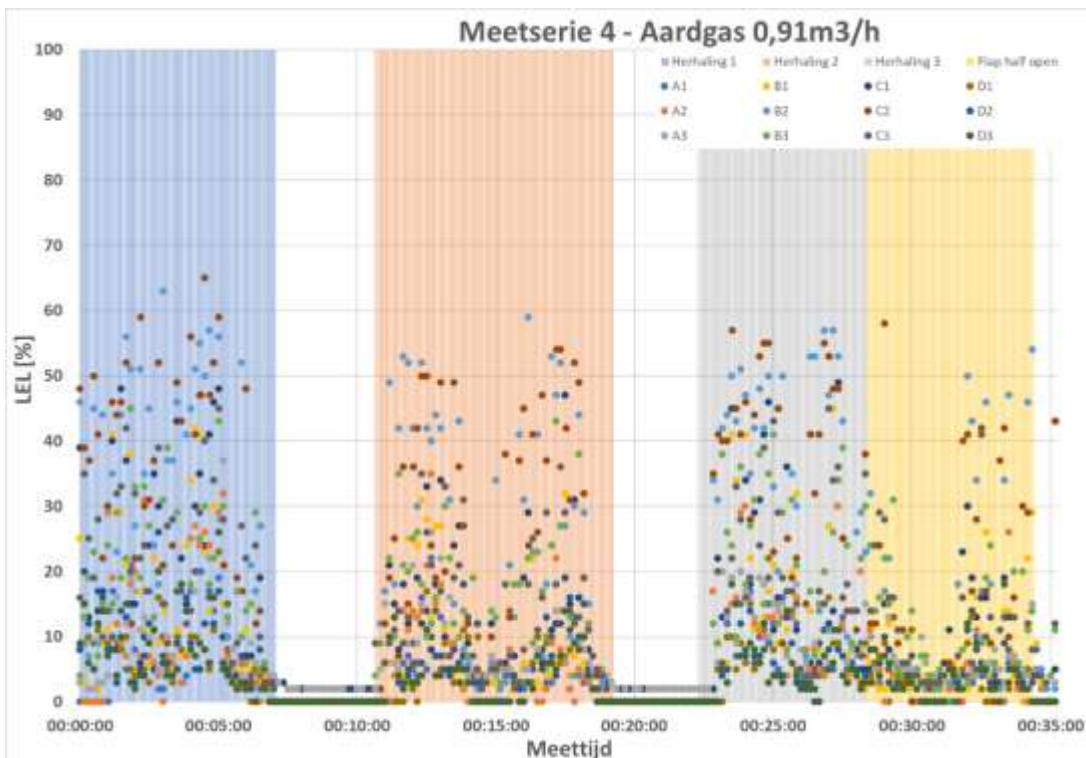
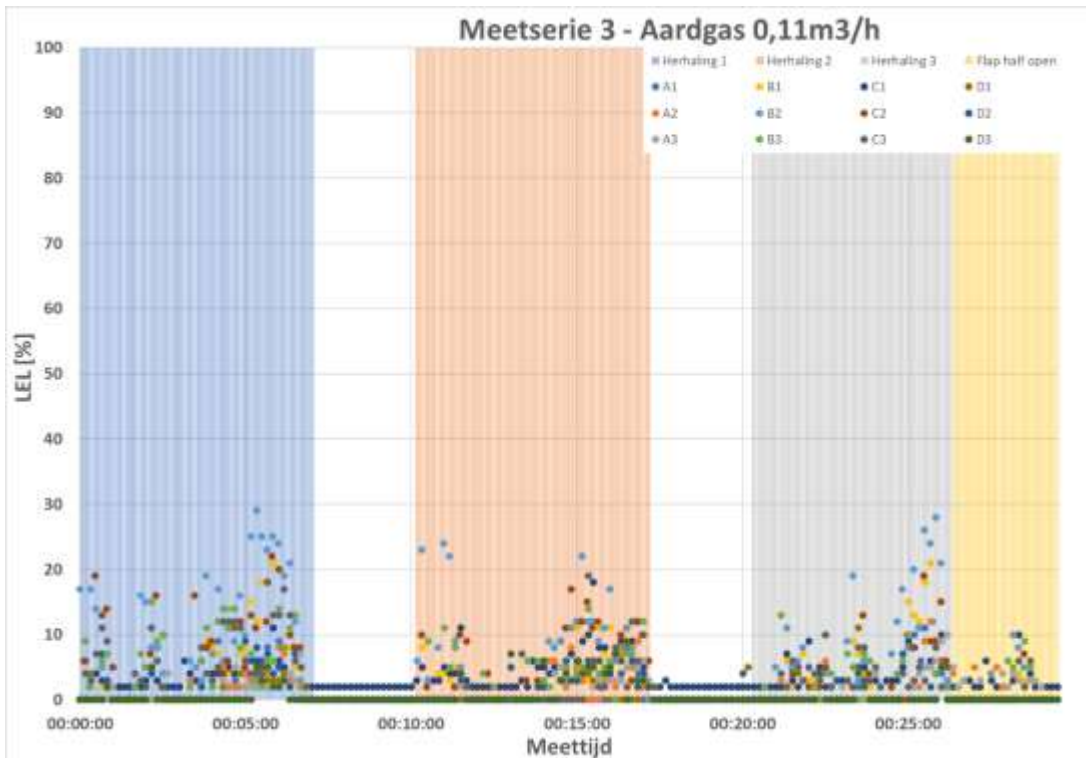
Qua energie die vrijkomt bij ontsteking kan het volgende gezegd worden. De inhoud van de buis is ongeveer $1.41m^3$. De totale energie die vrijkomt is dan voor waterstof (30%) 4.58MJ. Voor aardgas (9.5%) is het ongeveer 4.24MJ. (Bij normaalcondities). Komt deze in supersonische vlam snelheden vrij, betekend dit hetzelfde als ongeveer 1 kg TNT (ongeveer 4 handgranaten); [TNT equivalent - Wikipedia](#)

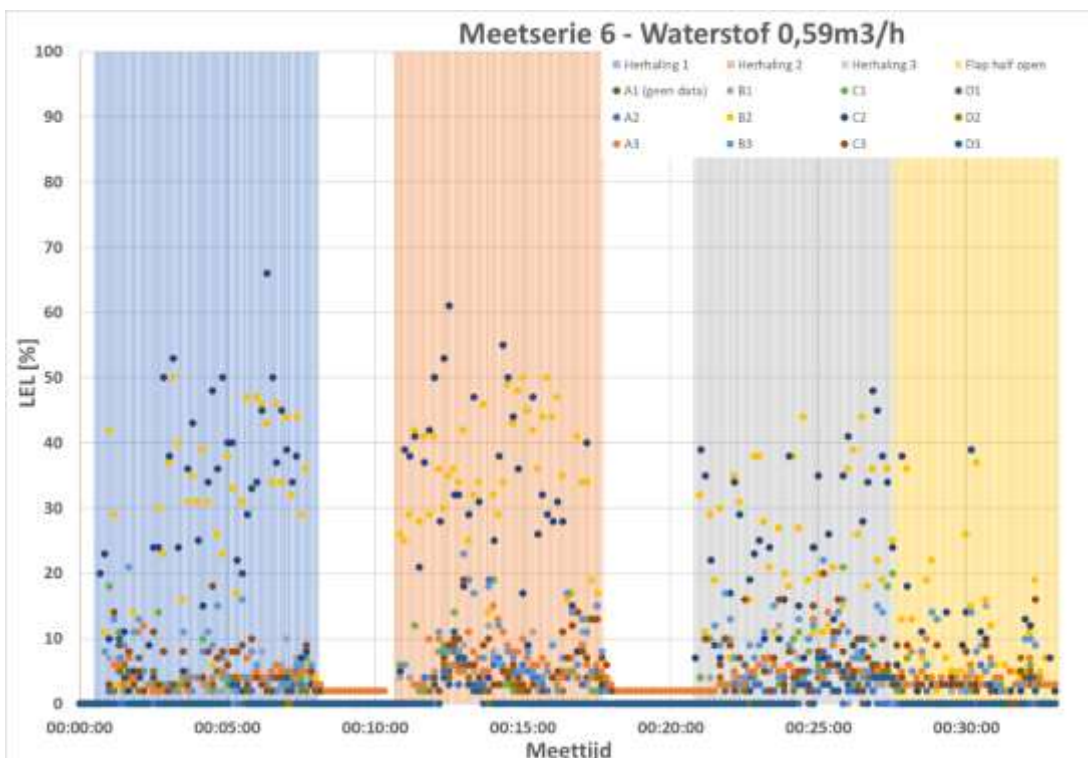
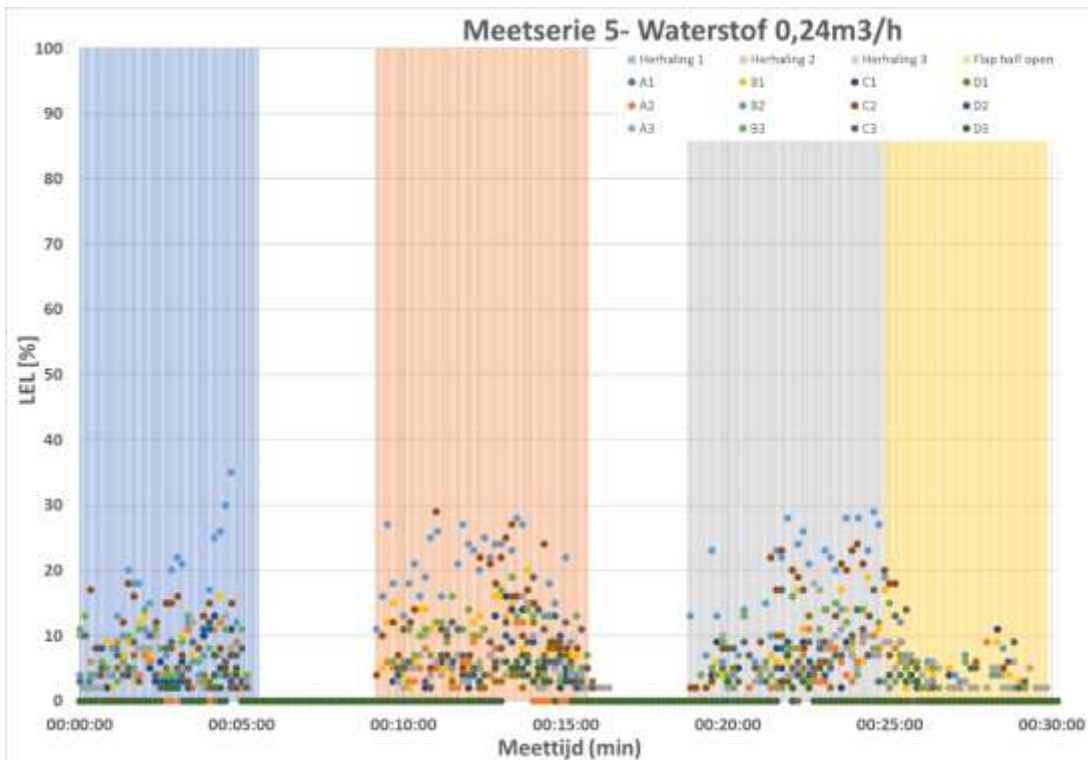
IV. Concentratie metingen in een werkput

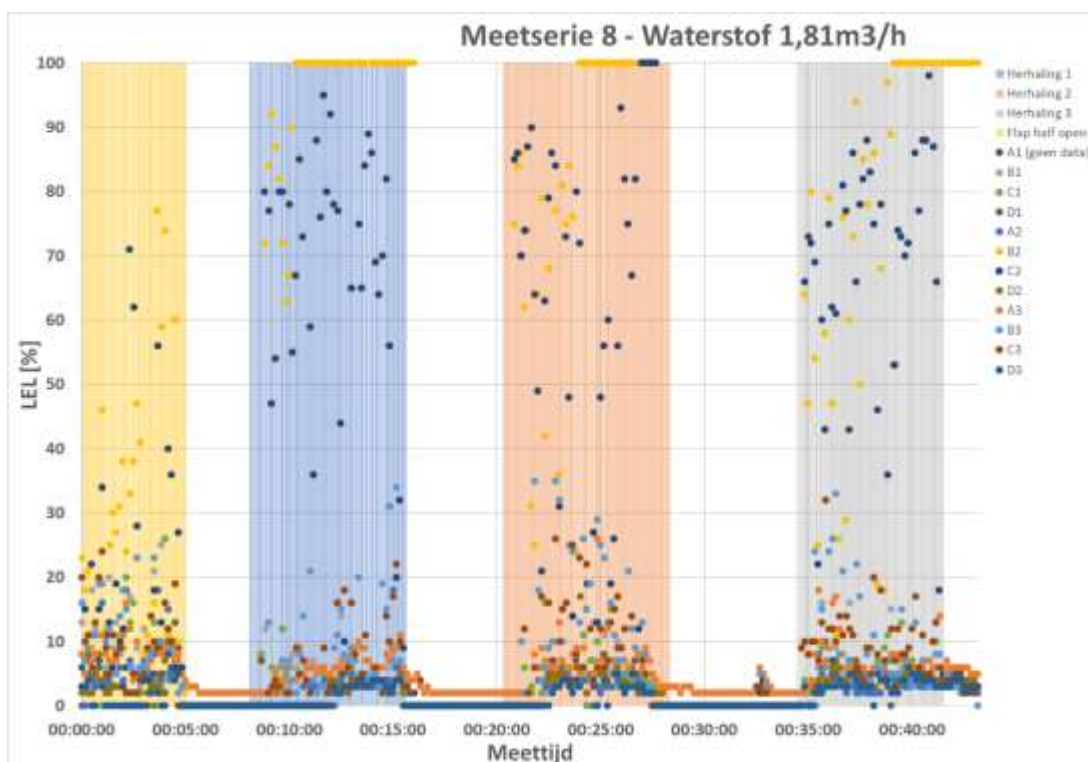
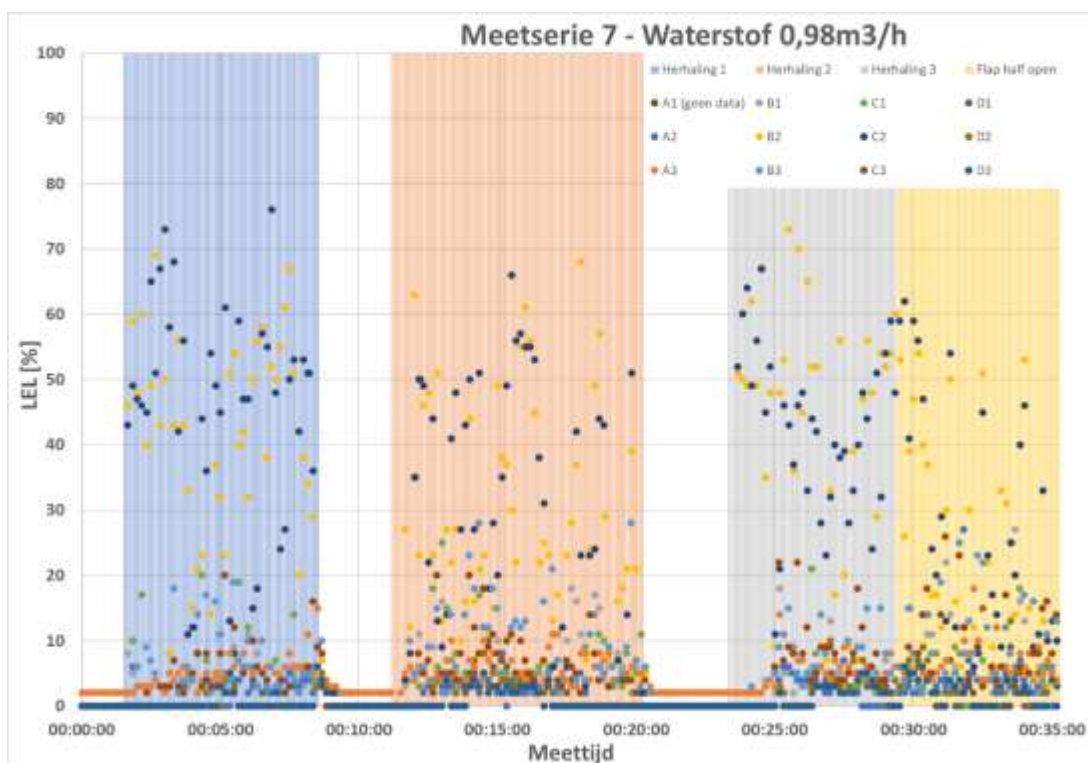
In deze bijlage zijn de grafieken opgenomen van de metingen (meetseries 1 t/m 10) ter bepaling van het maximale debiet waarbij de gasconcentratie in de werkput kleiner is dan 10% LEL. In de grafieken zijn de meetpunten weergegeven als A1 t/m D3. Deze meetpunten zijn als volgt in de werkput gesitueerd.

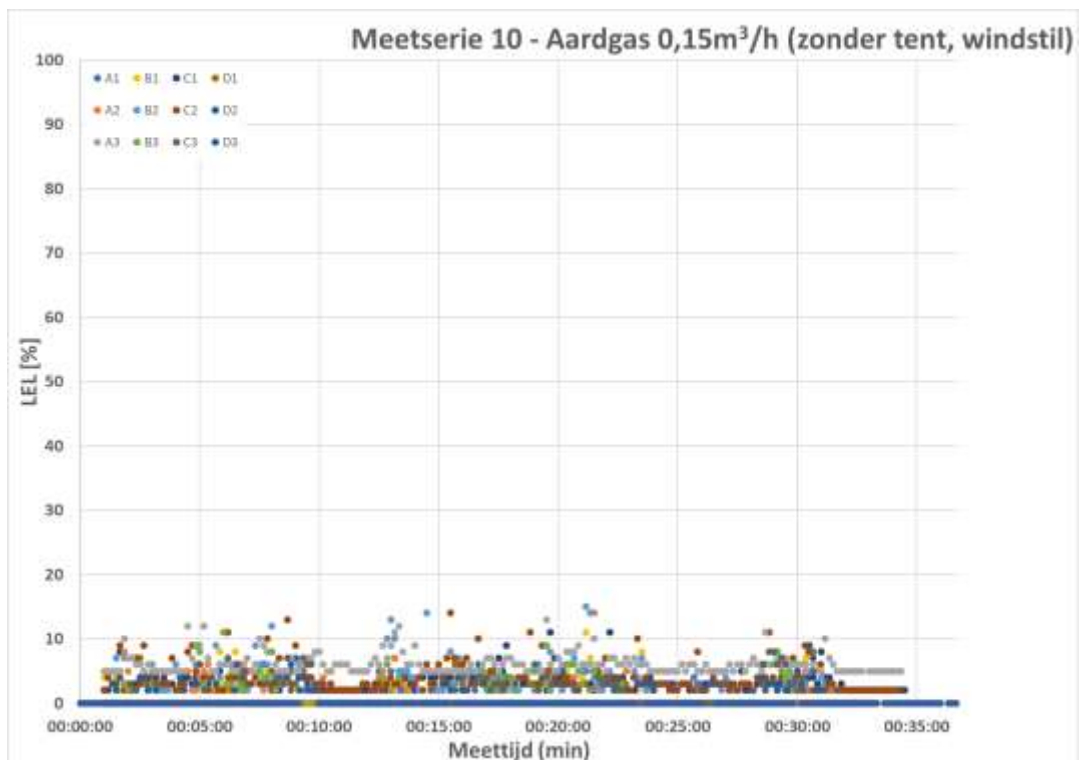
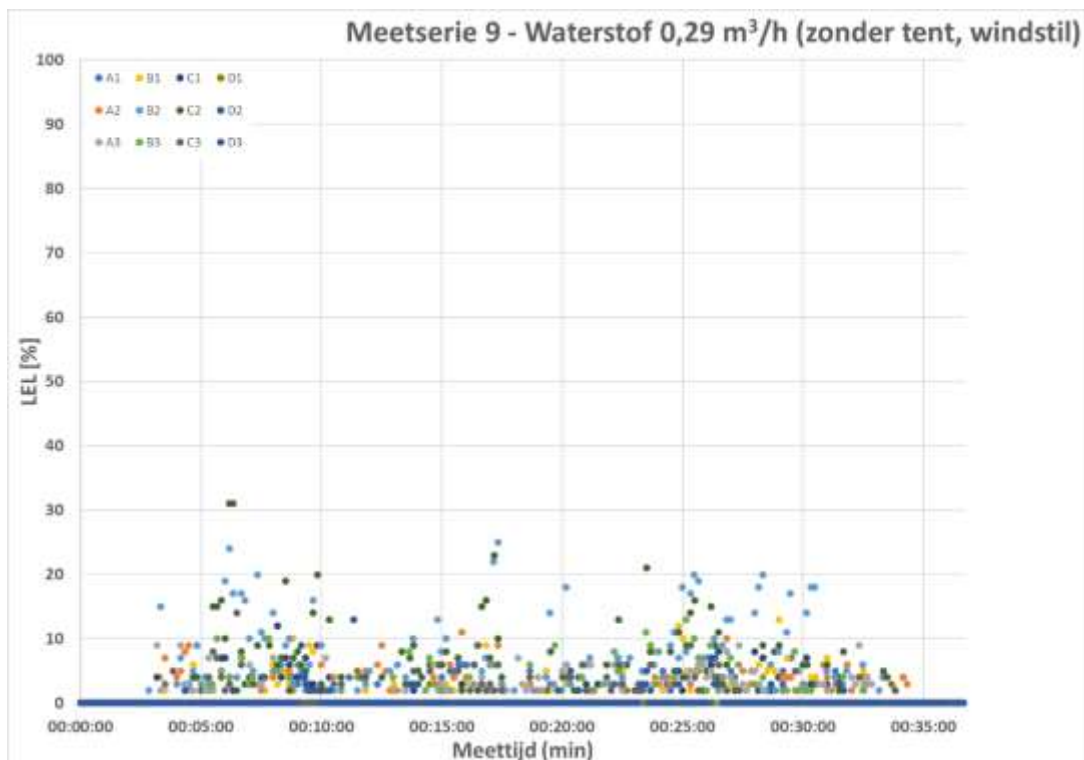












Tabel 23 Meetwaardenconcentraties in werkput. De oranje gekleurde waarden geven het percentage van de meetpunten > 10% LEL in de buitenring van de werkput. Licht oranje: voor waterstof. Donker oranje voor aardgas.

Meetserie	3	5	1	6	2	7	4	8	10	9
Medium	aardgas	waterstof	aardgas	waterstof	aardgas	waterstof	aardgas	waterstof	aardgas	waterstof
Wel / geen tent	wel	wel	wel	wel	wel	wel	wel	wel	geen	geen
Debiet (m3/h)	0,11	0,24	0,25	0,59	0,6	0,98	0,91	1,81	0,15	0,29
Totaal aantal meetpunten (mp)	2731	1912	2317	1925	2910	2274	2761	714	2298	4340
% mp die 0 % LEL zijn	72	67	45	47	39	30	48	48	51	72
% mp die > 0% LEL zijn	28	33	55	53	61	70	52	52	49	28
% mp die > 10% LEL zijn	4	9	22	13	32	20	21	17	1	2
% mp van de ring die 0 % LEL zijn	72	69	47	53	40	35	48	51	58	77
% mp van de ring die > 0 % LEL zijn	28	31	53	47	60	65	52	49	42	23
% mp van de ring die > 10 % LEL zijn	2	5	16	4	27	7	17	8	1	1
% mp van de middelste 2 mp die 0 % LEL zijn	68	59	36	21	34	6	46	33	17	48
% mp van de middelste 2 mp die > 0 % LEL zijn	32	41	64	79	66	94	54	67	83	52
% mp van de middelste 2 mp die > 10 % LEL zijn	11	23	51	54	55	74	40	63	3	7

De oranje gearceerde getallen geven het percentage meetwaarden dat groter is dan 10% LEL én zoals gemeten in de ring. Deze laten zien dat aardgas zich bij een ongeveer gelijk debiet meer verspreidt over de gehele werkput in vergelijking met waterstof.

V. Overzicht van uitgevoerde metingen op de Twente Safety Campus

Metingnr.	Datum meting	Serie	Gas	Lengte buis (m)	Gasdebiet (m ³ _n /uur)	Gebruik in dit rapport? (ja/nee)
1	10 okt	C	Aardgas	1	0,15	Ja
2	10 okt	C	Aardgas	1	0,15	Ja
3	10 okt	C	Waterstof	1	0,45	Ja
4	10 okt	C	Waterstof	1	0,45	Ja
5	11 okt	C	Aardgas	20	0,20	Ja
6	11 okt	C	Aardgas	20	0,20	Ja
7	11 okt	C	Waterstof	20	0,60	Ja
8	13 okt	D	Aardgas	1	4	Nee
9	13 okt	D	Aardgas	1	3	Ja
10	13 okt	D	Aardgas	1	4	Ja
11	13 okt	D	Aardgas	1	7	Ja
12	13 okt	D	Aardgas	1	7	Ja
13	13 okt	D	Aardgas	1	7	Ja
14	13 okt	D	Aardgas	1	7,5	Ja
15	13 okt	D	Waterstof	1	4	Ja
16	13 okt	D	Waterstof	1	4	Ja
17	13 okt	D	Waterstof	1	8	Ja
18	13 okt	D	Waterstof	1	8	Ja
19	13 okt	D	Waterstof	1	14	Nee
20	13 okt	D	Waterstof	1	15,5	Ja
C	Directe ontsteking na het vrijkomen van gas					
D	Vertraagde ontsteking na het vrijkomen van gas					
E	Plaatsen van een blaas na ontsteking van gas					

Meting 8 is niet gebruikt omdat de gewenste concentratie te snel werd bereikt. Er is geen ontsteking aangebracht en de volgende meting is gestart nadat de concentraties weer waren gezakt.

Meting 19 is niet gebruikt omdat er geen ontsteking is aangebracht.

Metingnr.	Datum meting	Serie	Gas	Lengte buis (m)	Gasdebiet (m ³ _n /uur)	Gebruik in dit rapport? (ja/nee)
21	14 okt	C	Waterstof	20	0,6	Ja
22	14 okt	C	Waterstof	20	0,6	Ja
23	14 okt	D	Waterstof	20	4	Nee
24	14 okt	D	Waterstof	20	6	Ja
25	14 okt	D	Waterstof	20	6	Ja
26	14 okt	D	Waterstof	20	15	Ja
27	14 okt	D	Waterstof	20	15	Ja
28	14 okt	D	Aardgas	20	4	Ja
29	14 okt	D	Aardgas	20	4	Ja
30	14 okt	D	Aardgas	20	4	Ja
31	14 okt	D	Aardgas	20	4	Ja
32	14 okt	D	Aardgas	20	7	Ja
33	14 okt	D	Aardgas	20	7	Ja
34	14 okt	D	Aardgas	20	8	Ja
35	14 okt	D	Aardgas	20	8	Ja
36	14 okt	D	Aardgas	20	8	Ja
37	14 okt	D	Aardgas	20	8	ja
38	19 okt	E	Aardgas	20	40	Nee
39	19 okt	E	Aardgas	20	40	Nee
40	19 okt	E	Aardgas	20	24	ja
41	19 okt	E	Aardgas	20	23	Ja
42	19 okt	E	Aardgas	20	23	Ja
43	19 okt	E	Waterstof	20	80	Ja
44	19 okt	E	Waterstof	20	80	Ja
45	19 okt	E	Waterstof	20	84	Ja
46	19 okt	E	Waterstof	20	80	Ja
C	Directe ontsteking na het vrijkomen van gas					
D	Vertraagde ontsteking na het vrijkomen van gas					
E	Plaatsen van een blaas na ontsteking van gas					

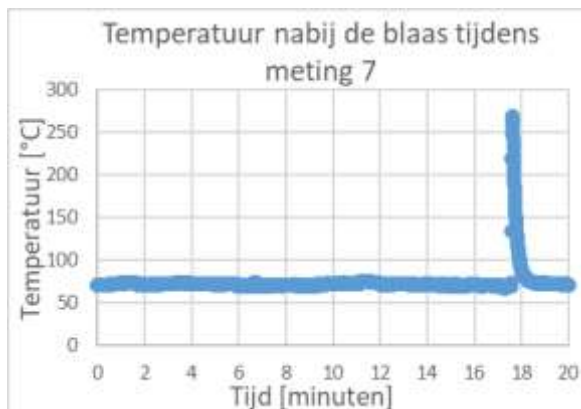
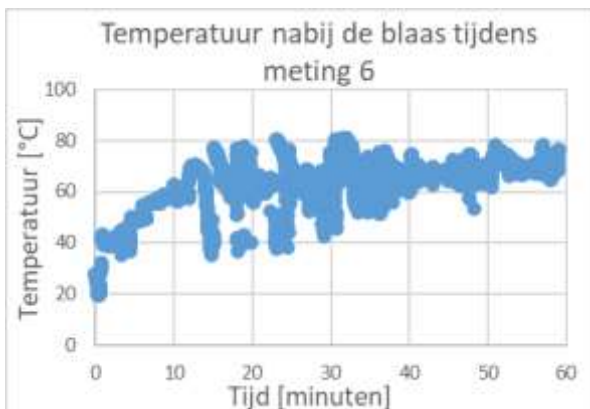
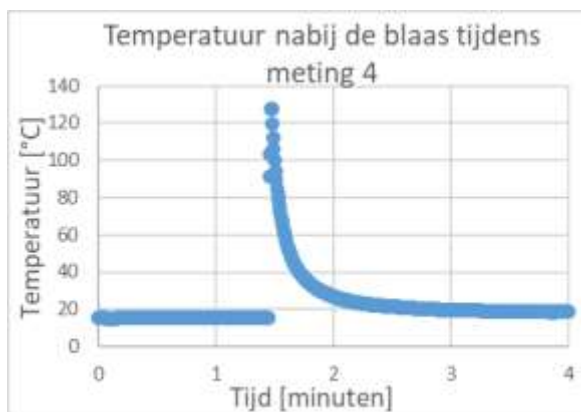
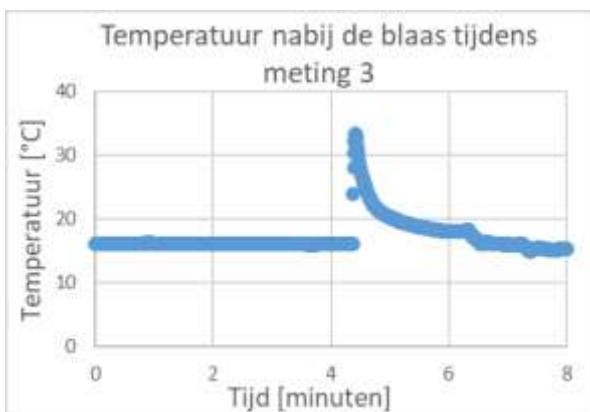
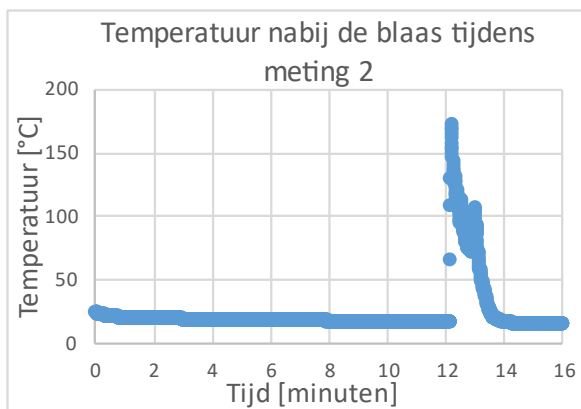
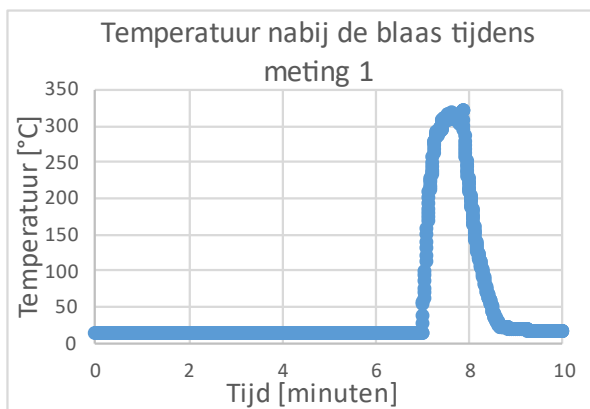
Meting 23 is niet gebruikt omdat de vonkontstekers niet werkten (die waren vochtig).

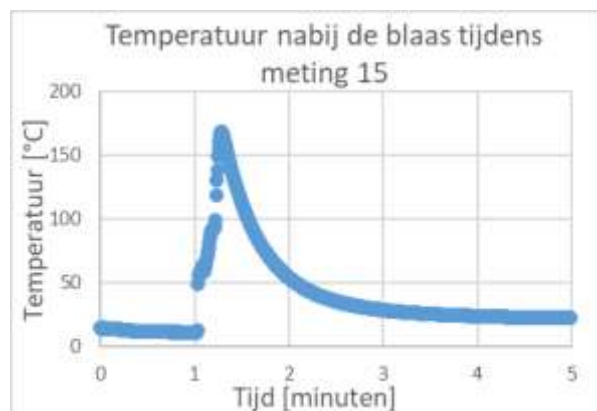
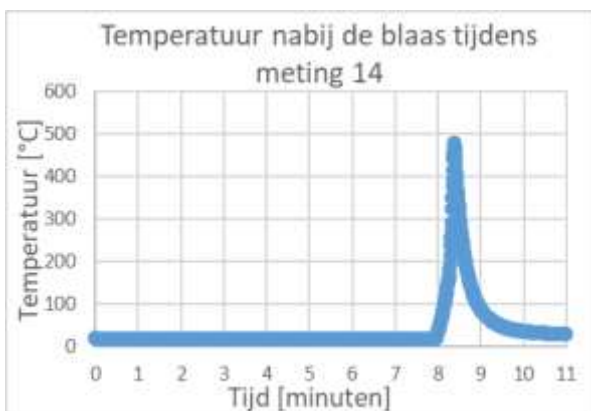
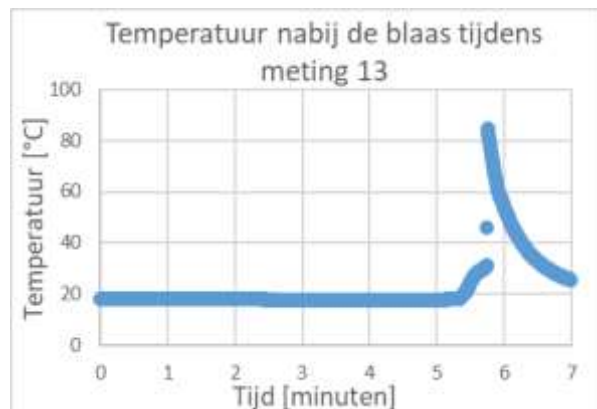
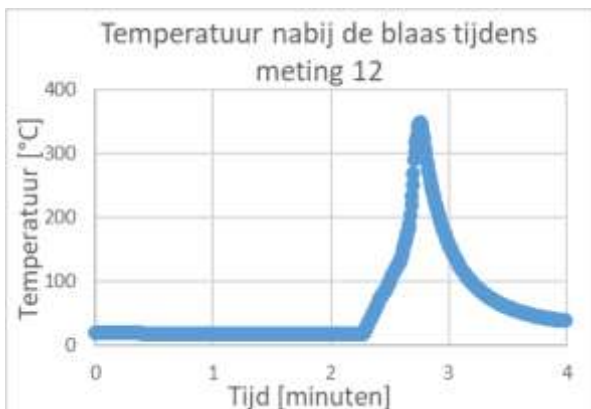
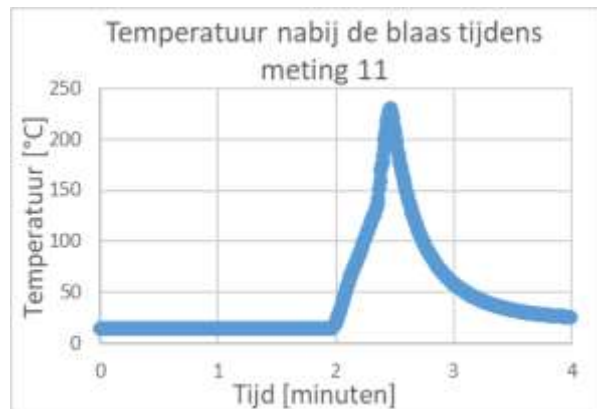
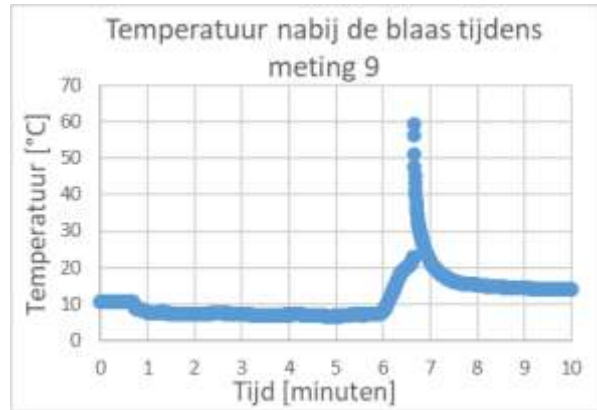
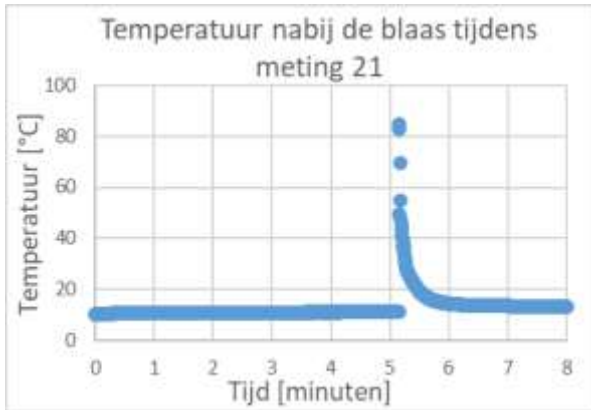
Meting 38 is niet gebruikt omdat de blaas in de verkeerde richting was geplaatst.

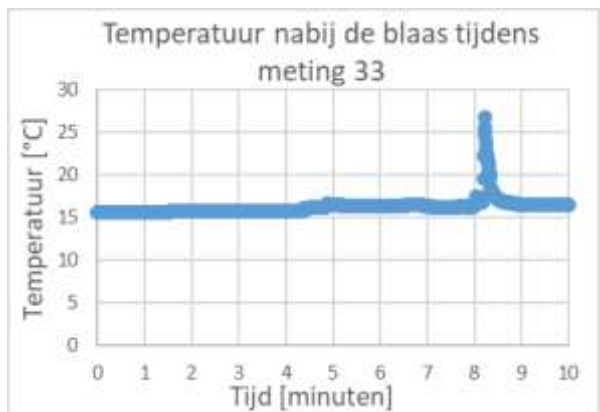
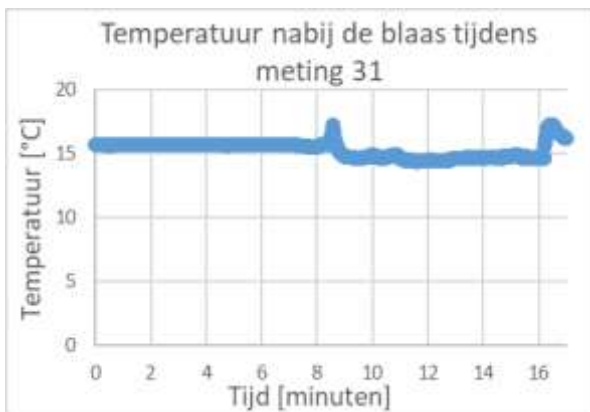
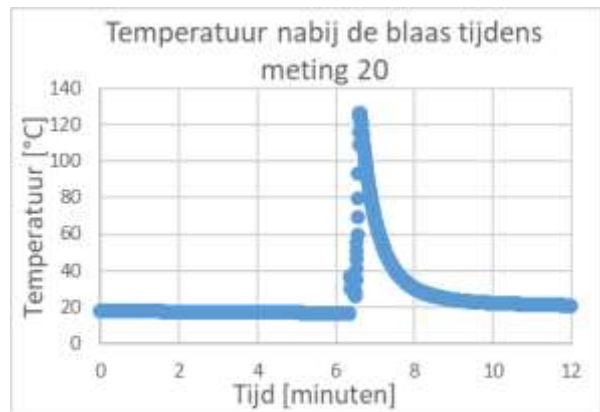
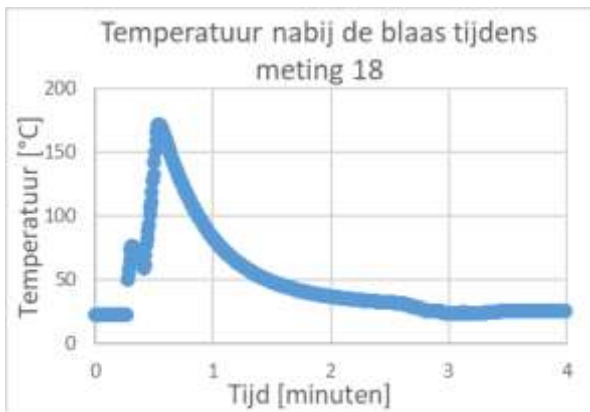
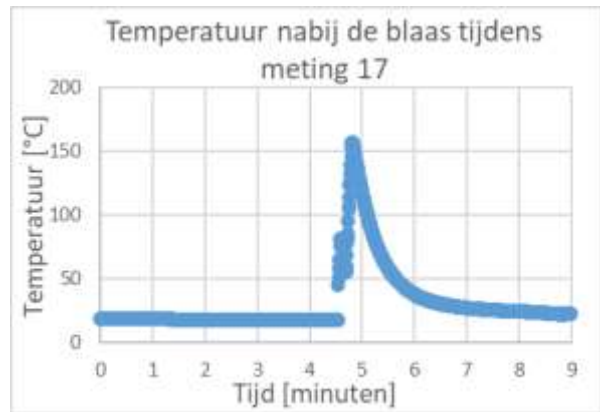
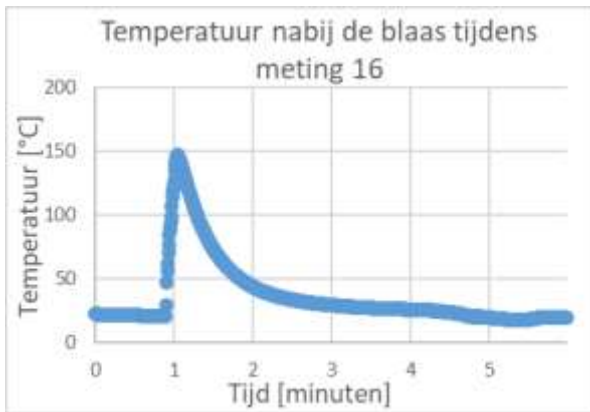
Meting 39 is niet gebruikt omdat de blaas na het zetten omdraaide (druk liep op tot ongeveer 5 bar).
 Bij de volgende meting is een regelset geplaatst.

VI. Temperatuurmetingen ontstekingsproeven

Daar waar de temperaturen tijdens de meting stijgt zijn grafieken per meting opgenomen.

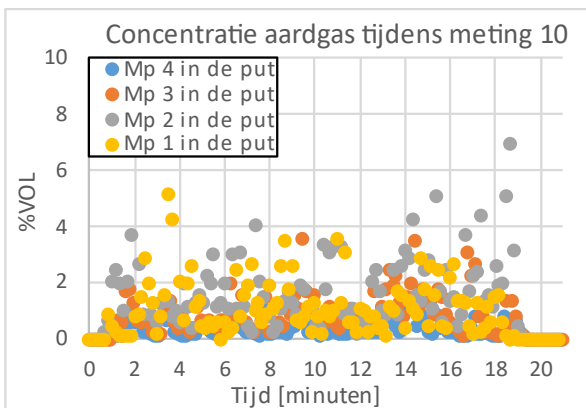
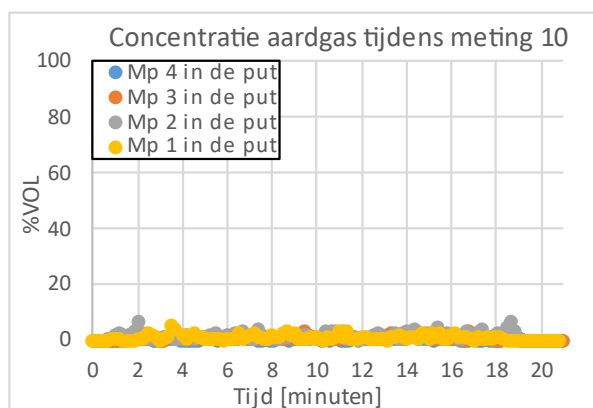
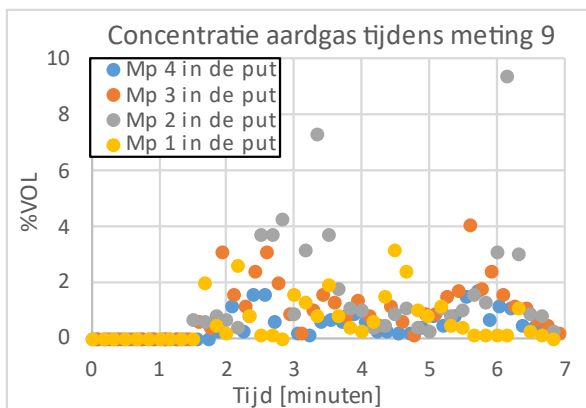
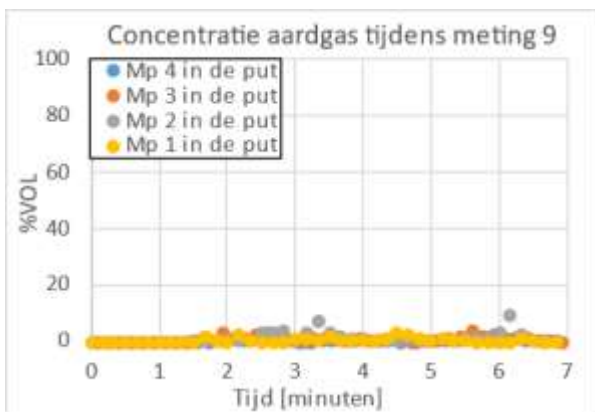
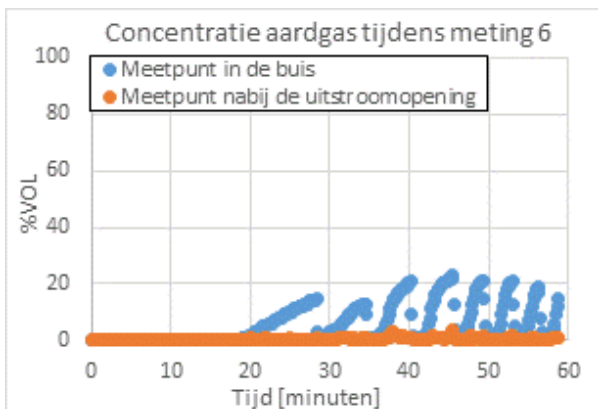


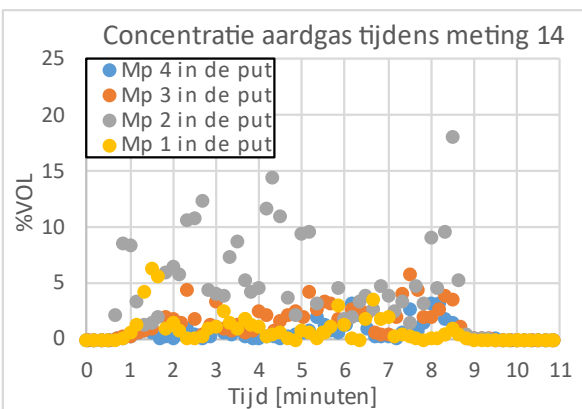
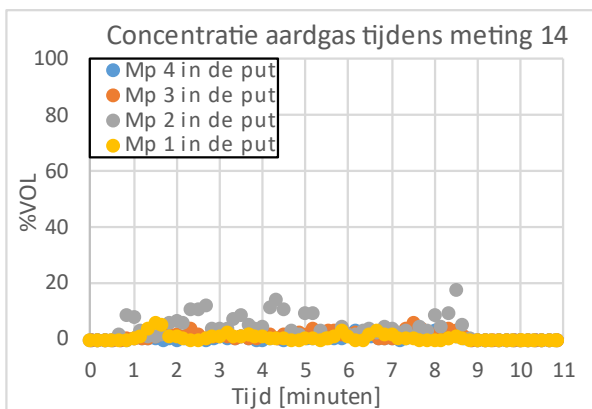
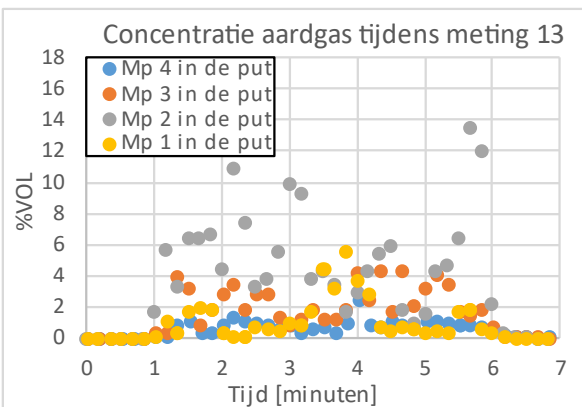
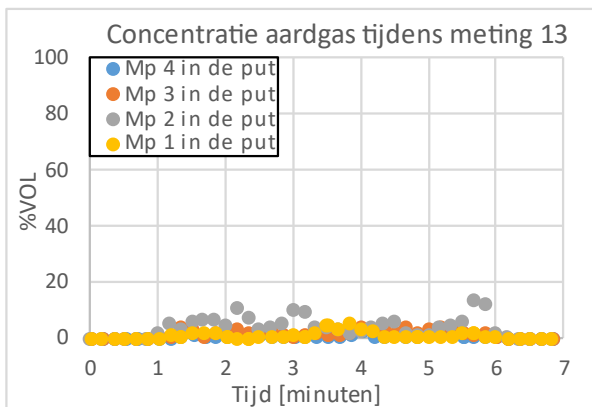
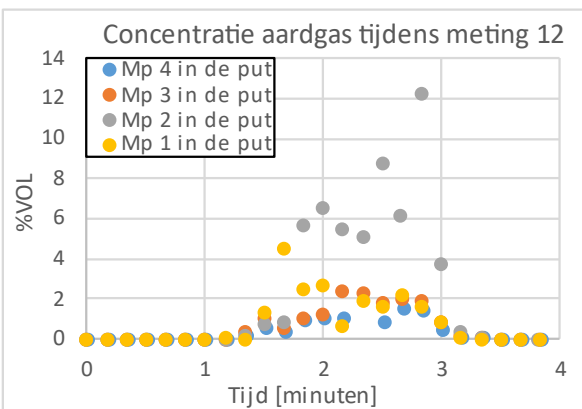
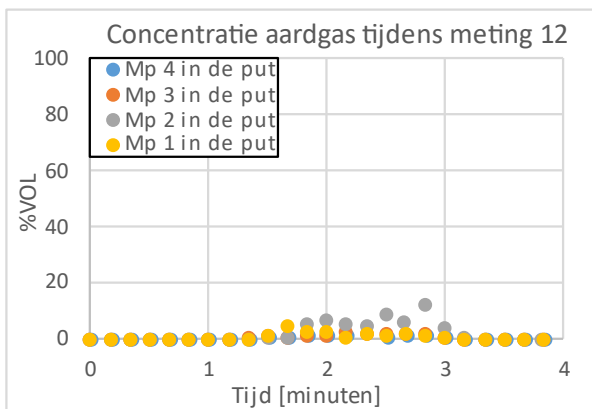
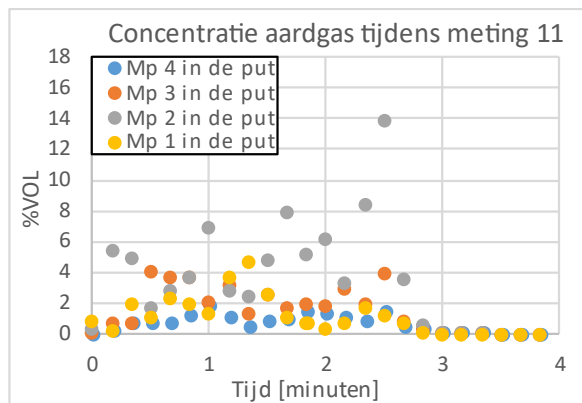
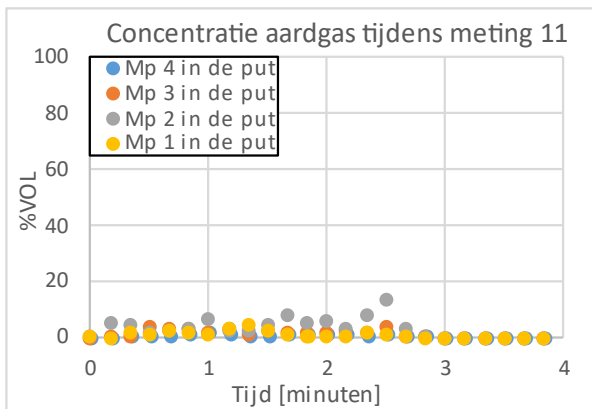


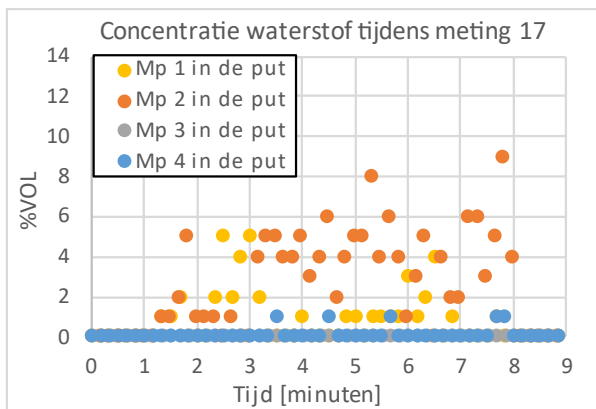
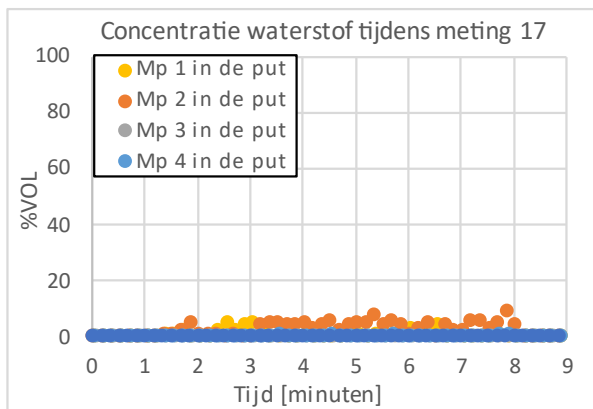
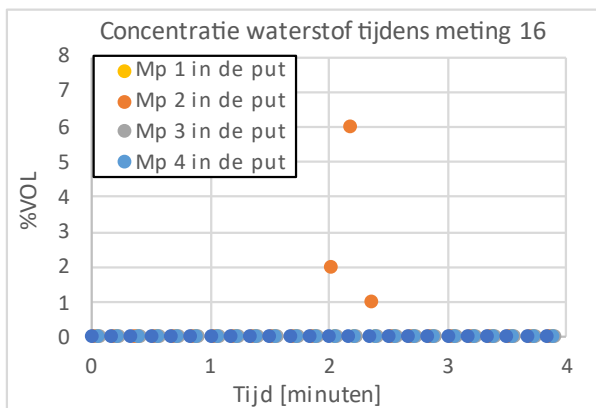
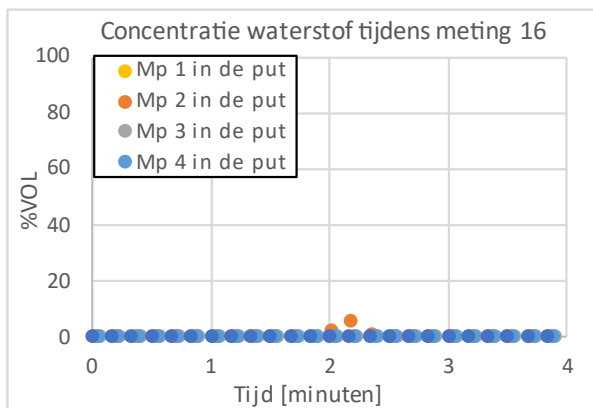
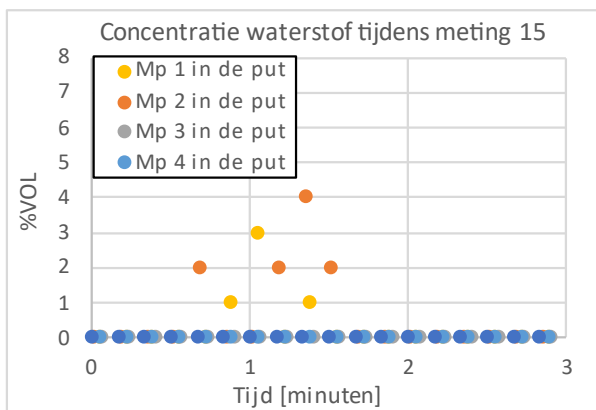
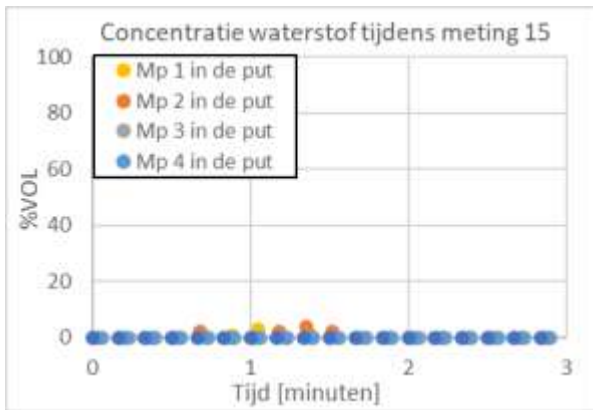


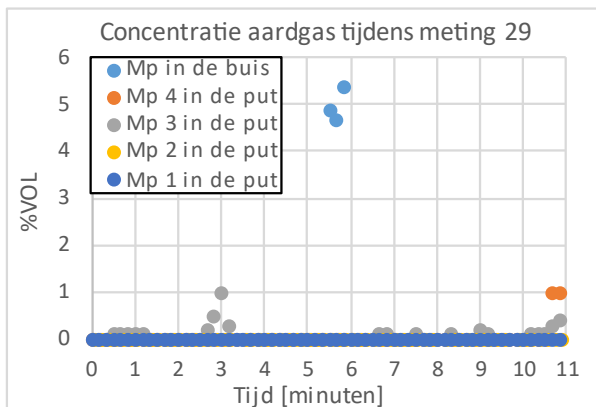
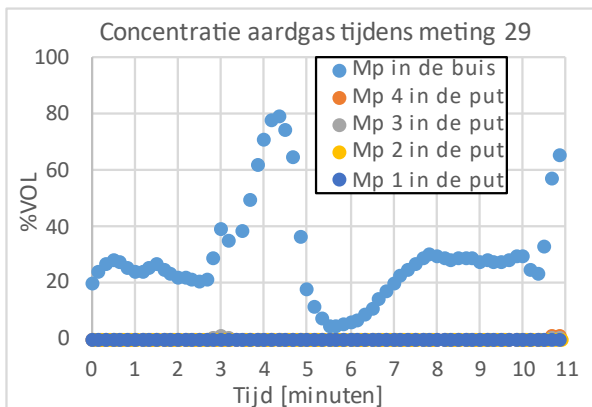
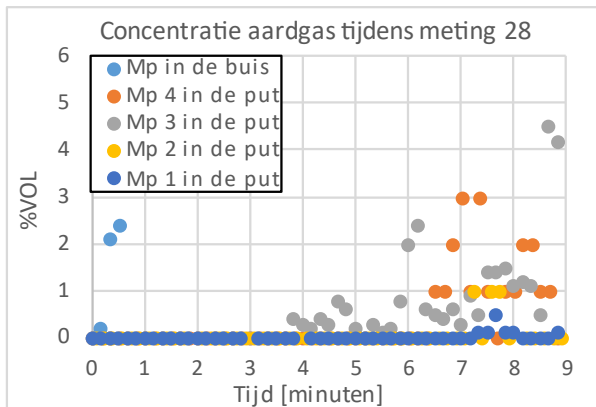
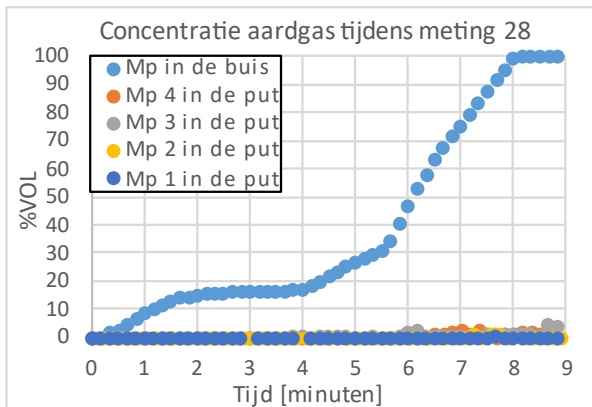
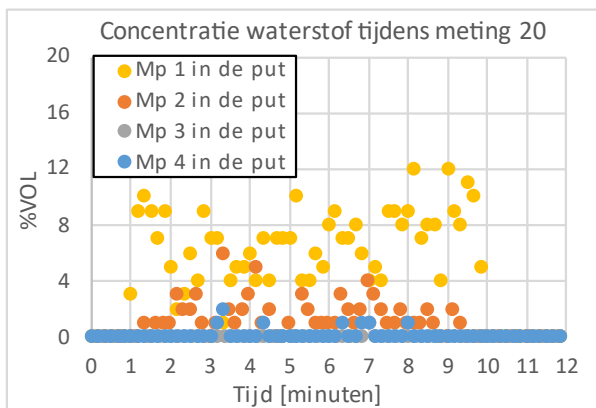
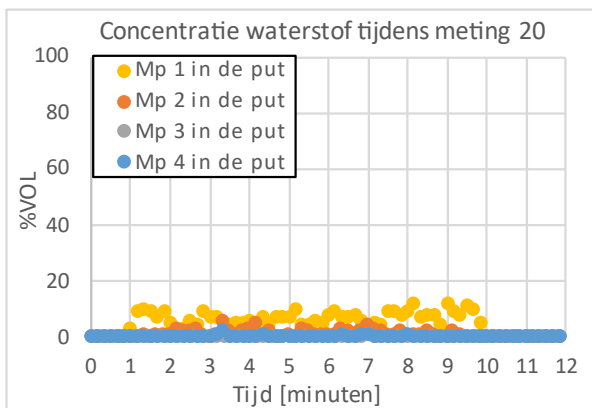
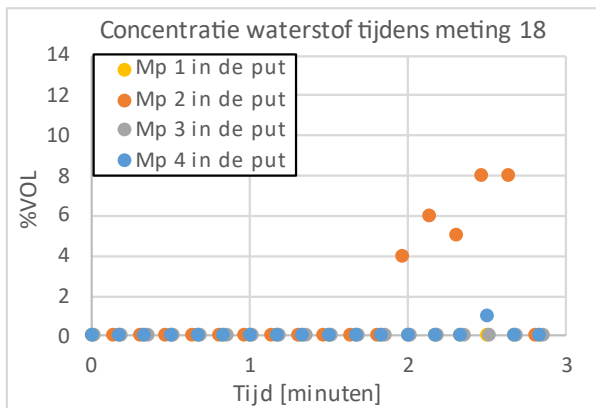
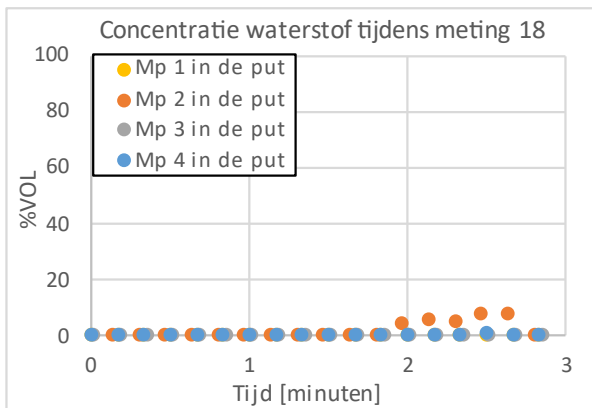
VII. Concentratie metingen ontstekingsproeven

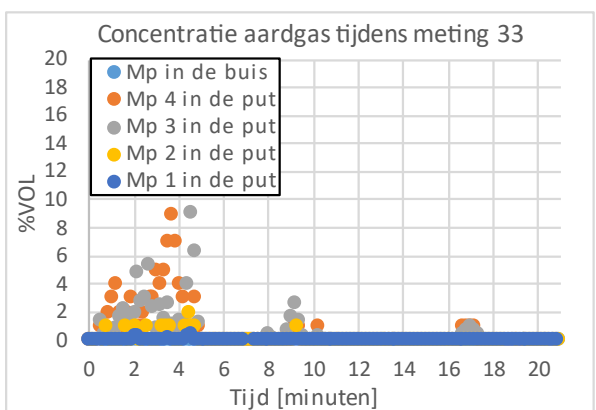
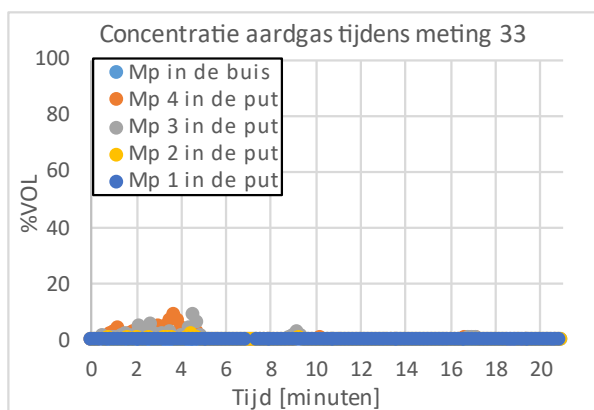
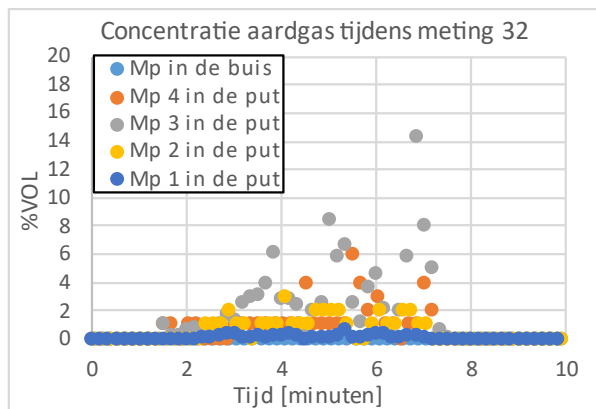
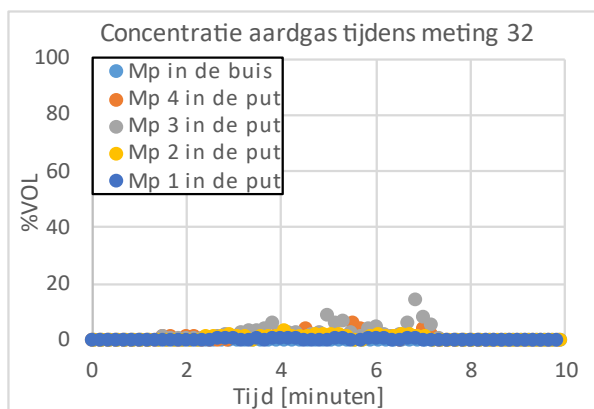
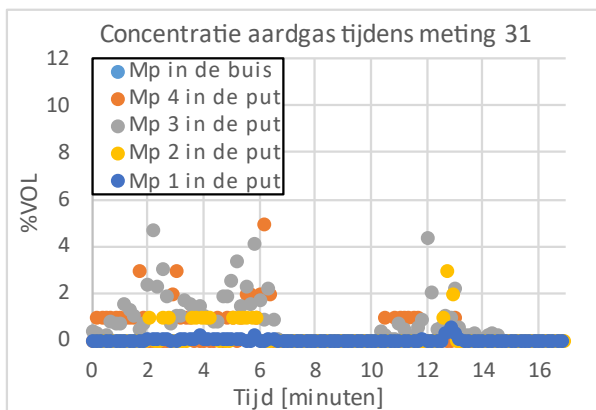
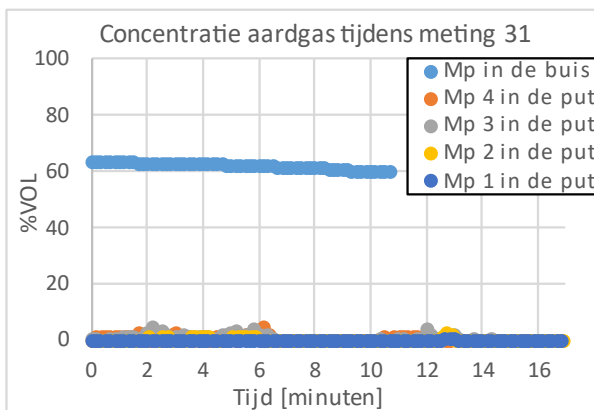
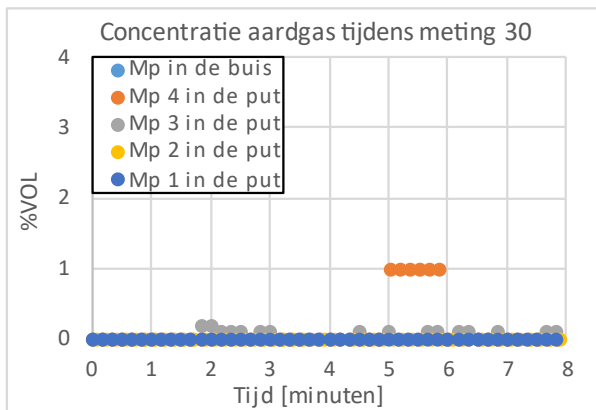
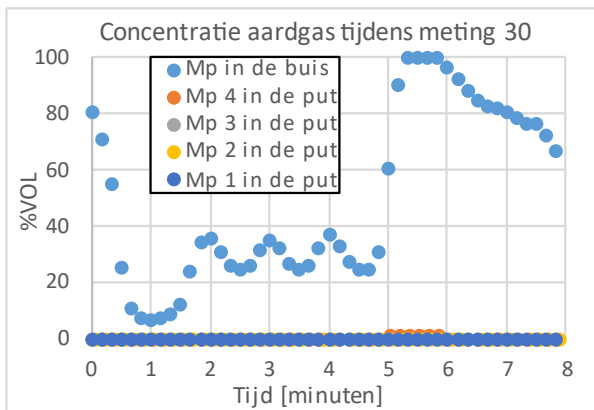
In deze bijlage de resultaten van de concentratiemetingen in de werkput. Deze zijn met name van belang voor de metingen met de vertraagde ontsteking. Daar waar een metingnummer twee keer wordt genoemd betreft het een weergave bij een andere schaal van de gasconcentratie. De metingen zijn opgenomen in de volgorde zoals ze ook in Hoofdstuk vier zijn opgenomen.

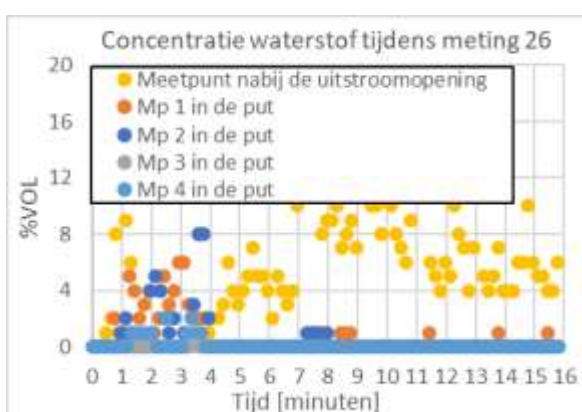
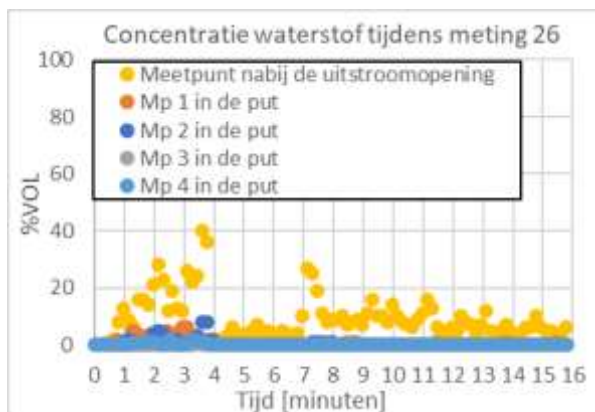
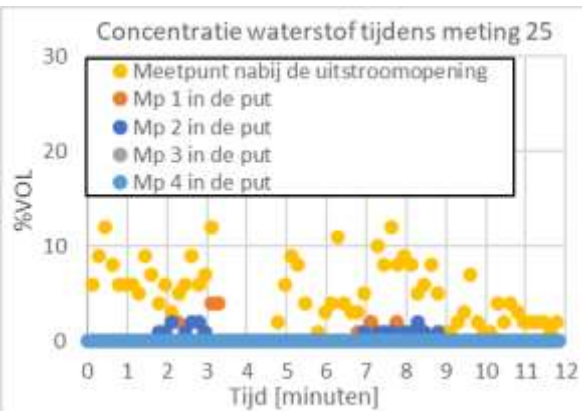
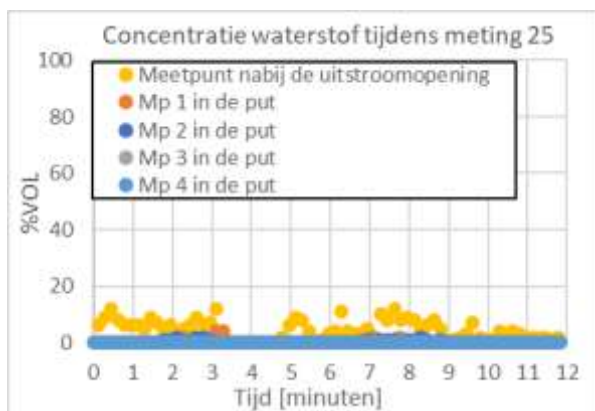
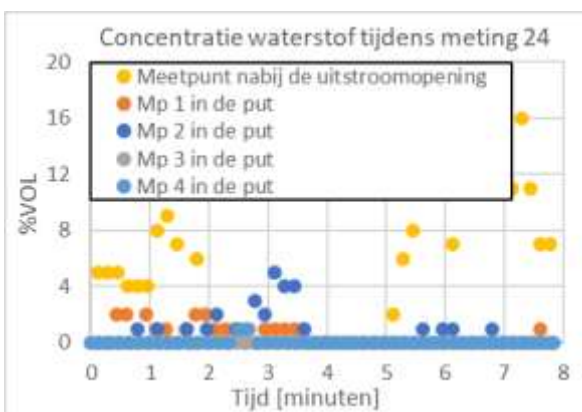
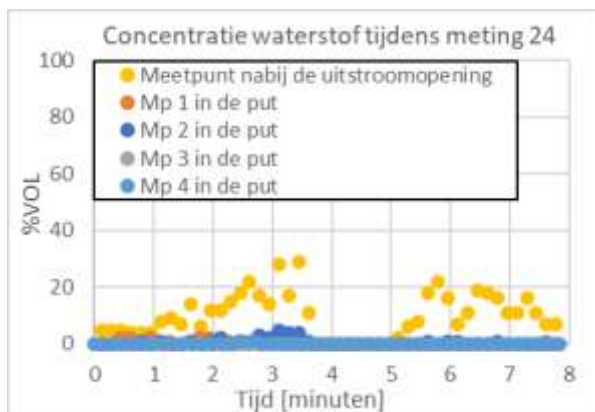
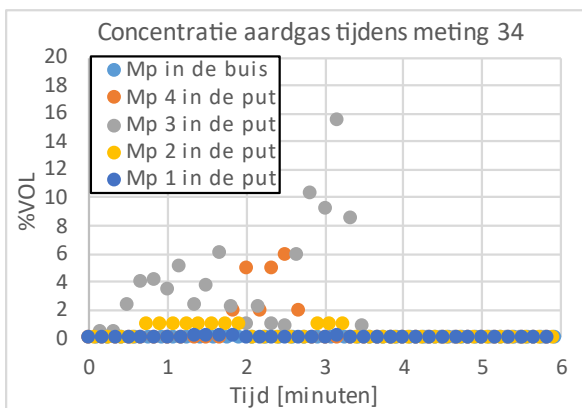
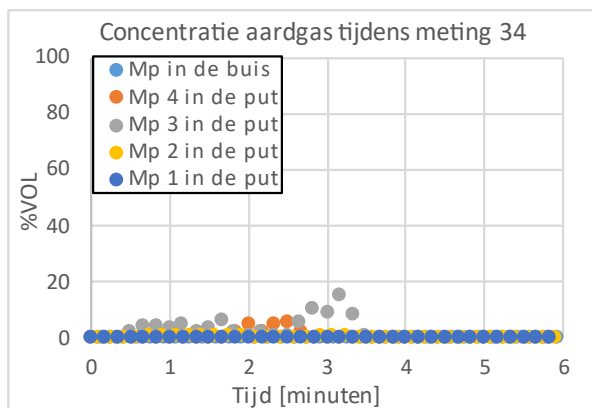


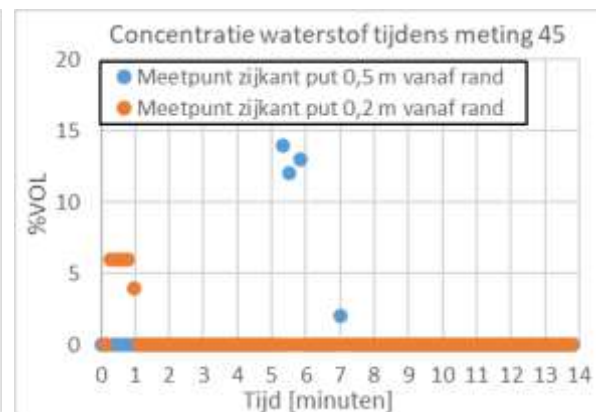
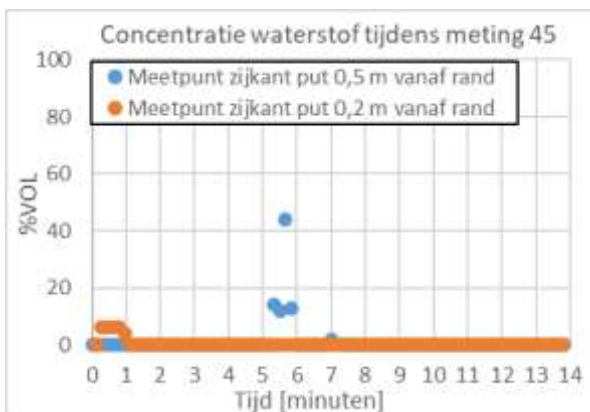
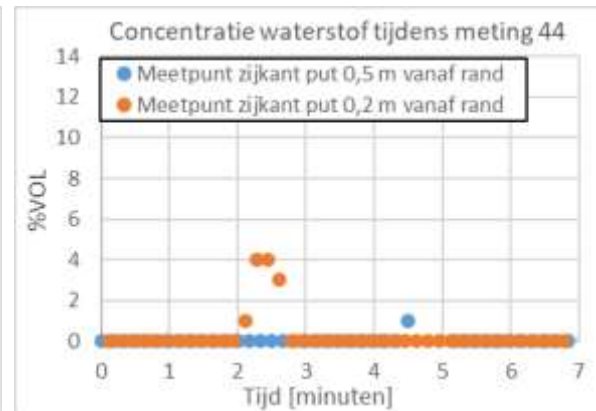
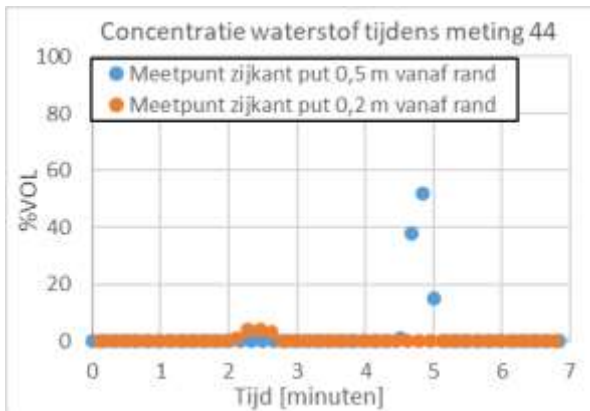
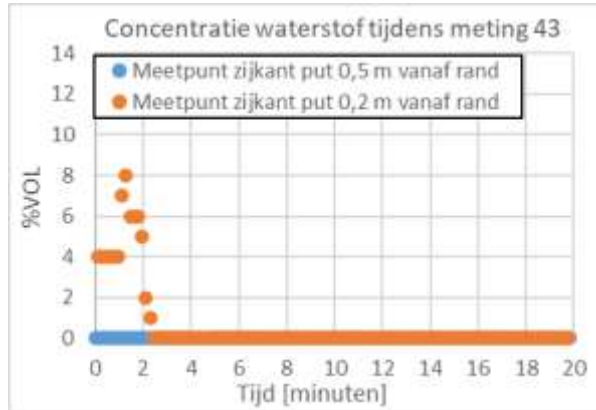
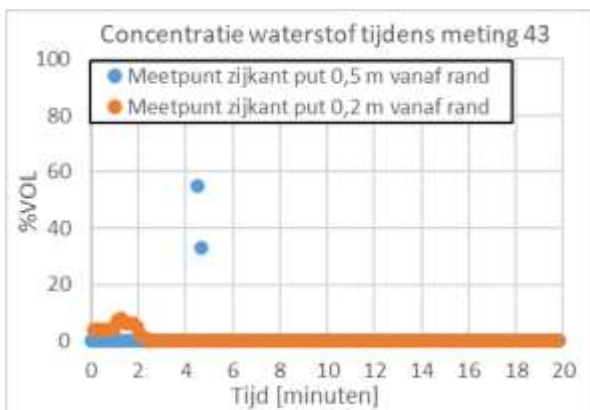
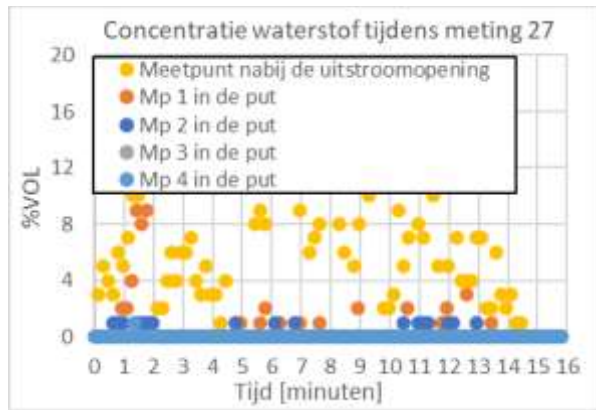
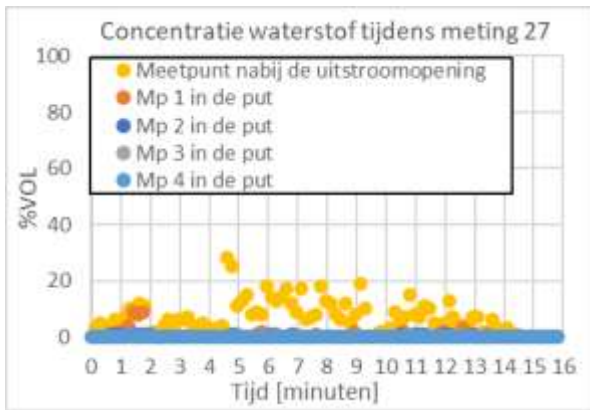


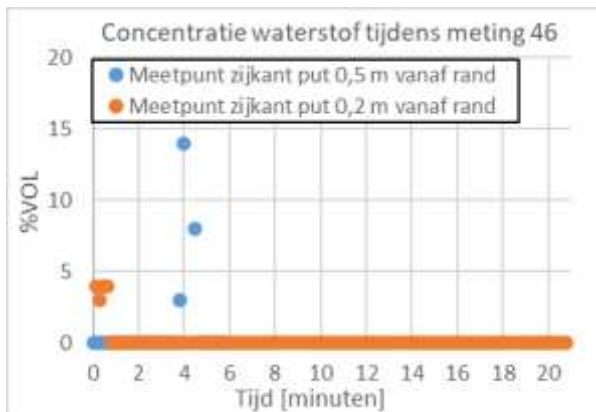
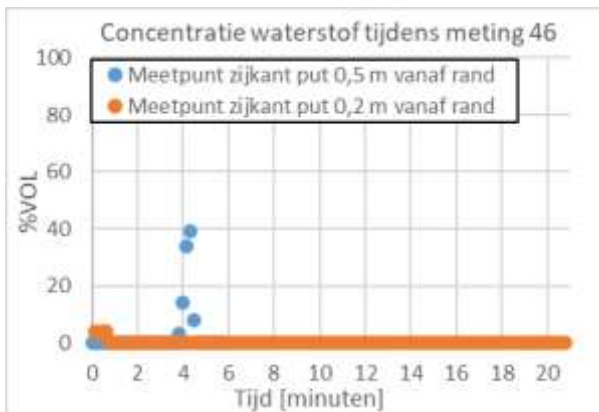












VIII. Warmtebeelden

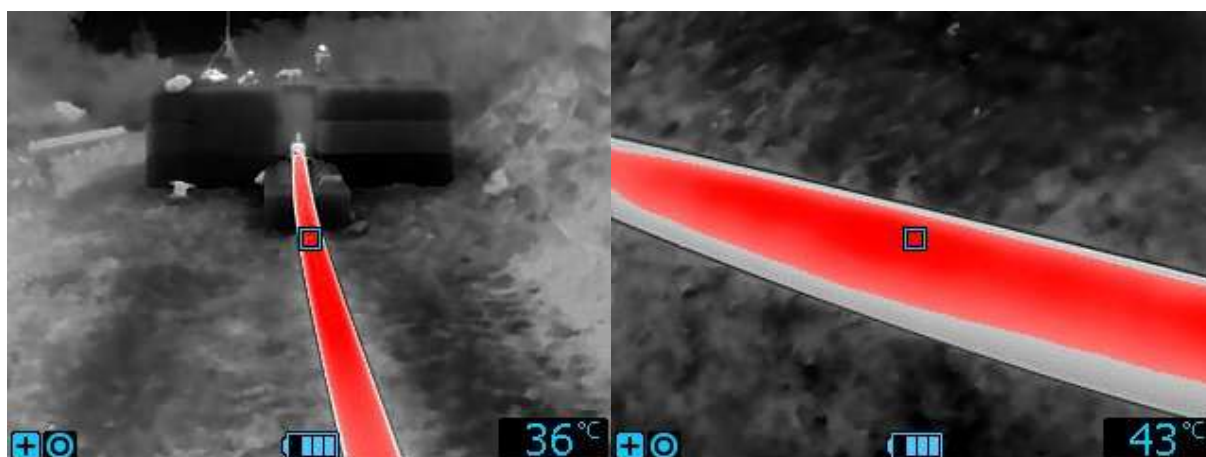


Foto 15: Warmtebeelden na meting 26



Foto 16: Warmtebeeld na meting 30, links gemeten direct buiten de werkput, rechts in de werkput

Op Foto 15: Warmtebeelden na meting 26. Op foto 15 is links het overzicht te zien na meting 26 (vertraagde ontsteking, 20m³/h waterstof). Rechts is de hoogst gemeten piekwaarde in temperatuur weergegeven. Deze temperaturen zijn gemeten circa 10 minuten na ontsteking van het waterstof. Omdat er vooraf geen referentiemeting is gedaan qua temperatuur, is het niet goed te bepalen wanneer de temperatuurstijging is ontstaan.

Op foto 16 zijn de temperaturen weergegeven na meting 30 (vertraagde ontsteking, 4m³/h aardgas). Hierbij ontstond er spontaan brand zonder dat de ontsteking actief was, in de binnenkant van de buis bleek nog een klein brandje aanwezig te zijn wat de hoge temperatuur verklaart.



Foto 17: Warmtebeeld meting 27 (15m³/h H₂)



Foto 18: Warmtebeeld meting 34 (8m³/h aardgas)

Op foto 17 en foto 18 zijn de warmtebeelden weergegeven bij de vertraagde ontstekingen bij respectievelijk waterstof en aardgas. De aardgasvlam is iets groter en heeft een hogere temperatuur. In het warmtebeeld van de aardgasvlam zijn oranje/rode vlekjes te zien wat wijst op temperaturen rond de 450°C.

IX. Beoordeling van gebruikte blazen

Na afloop van de experimenten zijn de blazen beoordeeld op beschadigingen en op dichtheid. In onderstaande tabel zijn deze bevindingen opgenomen. Op de volgende pagina's zijn foto's van de blazen met afwijkingen weergegeven.

Metingnr.	Cijfer	Datum	Codering blaas *	Serie	Sticker	Lengte buis (m)	Gas	Visuele beoordeling blaas	Dichtheid (3 minuten op druk houden van 0,1 bar)	Beoordeling aansluiting van blaas
1	I	10/10/2022	30-08-22 / 14	C	C1	1	AG	Groot gat	Niet op druk te krijgen	Smeltschade bij lanskoppeling
2	II	10/10/2022	05-09-22 / 66	C	C2	1	AG	Groot gat	Niet op druk te krijgen	Smeltschade bij lanskoppeling
3	III	10/10/2022	30-08-22 / 10	C	C3	1	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Smeltschade bij lanskoppeling
4	IV	10/10/2022	05-09-22 / 63	C	C4	1	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
5-6	V	11/10/2022	30-08-22 / 34	C	C5	20	AG	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
7	VI	11/10/2022	05-09-22 / 58	C	C6	20	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
8-14	VII	13/10/2022	05-09-22 / 81	D	D1	1	AG	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
15-20	VIII	13/10/2022	30-08-22 / 23	D	D2	1	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
21	I	14/10/2022	30-08-22 / 13	C	C7	20	H2	Blaas is intact	Niet op druk te krijgen	Aansluitkoppeling los van aansluitleiding. Ongeveer 60% afgebroken ring op aansluiting.
22	II	14/10/2022	30-08-22 / 18	C	C8	20	H2	Blaas los van aansluiting	Niet op druk te krijgen	Koppeling intact. Aan de koppeling zitten drie buisjes, de buitenste is losgeraakt. De veer in de meetbuisjes is niet meer aanwezig.
23-27	III	14/10/2022	05-09-22 / 75	D	D3	20	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
28-37	IV	14/10/2022	05-09-22 / 71	D	D4	20	AG	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
38-39	I	19/10/2022	05-09-22 / 59	E	E1	20	AG	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
40-42	II	19/10/2022	05-09-22 / 73	E	E2	20	AG	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
43-46	III	19/10/2022	05-09-22 / 69	E	E3	20	H2	Geen afwijking	Op druk te houden	Geen afwijking
Blaas niet akkoord						Blaas akkoord				
De gebruikte blazen zijn van fabrikant Kleiss, type MDS B500 D3(P3) - Ø 120-170 mm - de unieke code (met testdatum) is bij de codering hierboven opgenomen.										



Blaas C1; beschadigd bij meting 1 – directe ontsteking van aardgas



Blaas C1; een gat ontstaan als gevolg van een te hoge temperatuur



Blaas C2; beschadigd bij meting 2 – directe ontsteking van aardgas



Blaas C2; een gat ontstaan als gevolg van een te hoge temperatuur



Blaas C2; beschadiging bij de lans aansluiting (smeltschade)



Blaas C3; beschadigd bij meting 3 – directe ontsteking van waterstof, een beschadiging bij de lans aansluiting (smeltschade)



Blaas C3; de blaas is op druk te brengen en te houden (akkoord)



Blaas C7; Bij meting 21 (directe ontsteking waterstof in een 20 meter leiding) is de aansluitleiding afgebroken



Blaas C7; een detail van het afgebroken deel van de aansluiting



Blaas C7; Detail van het afgebroken deel van de lansaansluiting



Blaas C8; Bij meting 22 (directe ontsteking waterstof in een 20 meter leiding) is de blaas losgeraakt.



Blaas C8; de aansluiting van de losgeraakte blaas

X. Koppelingen naar videomateriaal

Tijdens de ontstekingsproeven op de Twente Safety Campus zijn de verschillen metingen vastgelegd op video. Via onderstaande verwijzingen is het videomateriaal te zien;

Directe ontsteking: HyDelta, WP6B-2: Experimenten gasblazen, deel 1
<https://youtu.be/Kr890wk9H5I>

Vertraagde ontsteking: HyDelta, WP6B-2: Experimenten gasblazen, deel 2
<https://youtu.be/qKJJoAw25to>

Doven van een brand: HyDelta, WP6B-2: Experimenten gasblazen, deel 3
<https://youtu.be/Ph8tWDWkJR0>

Complete video: HyDelta, WP6B-2: Experimenten gasblazen, compleet
<https://youtu.be/pDTR5Btzn9Y>