

# Projecteindrapport

Project: RPAS meets Firefighting

## Documenteigenschappen

### Documentrevisies

Versie	Status	Datum	Wijzigingen
0.1	Concept	13-1-2020	
0.2	Concept	21-2-2020	
0.3	Definitief	29-6-20	

-

### Projecteigenschappen

Projectmanager:	Jaap Knotter, Rick Veenstra
Opdrachtgever:	Alexander Jansen

## Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

Pagina 2 van 26

### Doel van dit document

Het projecteindrapport vergelijkt het werkelijke projectverloop en de uitkomsten met het projectinitiatiedocument en de goedgekeurde wijzigingen. Het bevestigt de overdracht van alle eindproducten en geeft aanbevelingen voor vervolgacties.

Het projecteindrapport verschaft de Stuurgroep voldoende informatie om het project af te sluiten en decharge te verlenen aan de projectmanager.

## Afkortingenlijst

AFT advanced forensic technology  
AGS adviseur gevaarlijke stoffen  
AGW Alarmeringsgrenswaarde  
ATEX ATmosphères EXplosibles  
CSV Comma-separated values  
GC-MS Gas chromatography- mass spectrometry  
IFV Instituut fysieke veiligheid  
IL&T Inspectie Leefomgeving en Transport  
IMS Ion mobility spectrometer  
LBW levensbedreigende waarde  
LEL Lower explosive limit  
LORA Long Range  
MOD Milieuongevallendienst  
NVWA Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit  
PCA Principal Component Analysis  
PID Photo ionization Device  
PPM Part per million  
PUF polyurethaan foam  
RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu  
RPAS Remotely piloted aircraft systems  
SEM Scanning electron microscope  
TFF Tech for future  
TRL technical readiness level  
TSC Twente Safety Campus  
WFSR Wageningen food safety research

## Inhoud

<b>1.Management samenvatting</b>	<b>5</b>
Eindresultaat:	5
<b>2.Behaalde doelstellingen</b>	<b>6</b>
Demonstrator	6
Kennisopbouw sensoren	7
Trainingen Kennisverspreiding en werkgelegenheid	7
<b>3.Resultaten en kwaliteit</b>	<b>9</b>
Fase 1 Welke stoffen meten met welke technieken?	9
Fase 2 kun je giftige stoffen meten m.b.v. een drone?	12
Gasmeetbuizen	14
Fase 3 Veld testen	16
Gassensoren	Error!
<b>Bookmark not defined.</b>	
Software en real-time data: Stoplichtmodel	18
Grote schaal houtbrand	19
Fijnstof en mogelijke asbest opvang	19
Fase 4 Een echt scenario: huiskamerbrand <sup>18</sup>	21
Gasbemonstering door middel van tedlar zakken	21
Experimentele validatie brand componenten: Tedlar zakken	22
<b>4.Kosten</b>	<b>23</b>
<b>5.Planning</b>	<b>23</b>
<b>6.Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>23</b>

## 7. Leerpunten

24

### *Management samenvatting*

Het TFF-project RPAS meets Firefighting<sup>1</sup> is een samenwerking tussen Robor Electronics BV, Twente Safety Campus, Brandweer Twente en Saxion. Het project heeft voor ogen gehad om:

- 1 Een commerciële/ standaard drone (welke tot de standaarduitrusting van de brandweer behoort) te voorzien van sensoren/ een sensorpakket, dat in staat is om real-time de samenstelling van rookwolken (die bij branden ontstaan) te detecteren en “on site” kan analyseren. Tijdens het onderzoek is een top twintig van meest gevaarlijke stoffen die vrij kunnen komen bij een brand samengesteld. Het door ons ontwikkelde sensorpakket is in staat om deze twintig meest gevaarlijke stoffen te detecteren. Het sensorpakket is tevens robuust (in staat om in operationele omstandigheden te functioneren) en de plaatsing onder de drone is dusdanig ontworpen, dat de “downwash” van de rotoren geen negatieve invloed kan hebben op de detectie.
- 2 De analyseresultaten worden real-time verkregen en de interpretatie ervan dient “user-friendly” te zijn en afgestemd op de wens en behoefte van de eindgebruikers (dronepiloot en Adviseur Gevaarlijke Stoffen). Hierbij is gebruik gemaakt van een stoplicht-model (wens eindgebruiker).
- 3 In de lucht monsters veilig te stellen voor verder (forensisch) onderzoek.

Behaalde doelstellingen: <sup>1</sup>



**Foto: demonstrator drone en sensoren**

- Oplevering van een sensorpakket (demonstrator), getest conform operationele omstandigheden (TRL6), inclusief monsters veiligstellen in de lucht.
- Kennisopbouw detectiemogelijkheden m.b.v. sensoren
- Kennisopbouw applicatie mogelijkheden drone.
- Mogelijkheden voor commerciële doorontwikkelingen van sensorpakket i.s.m. Robor Electronics BV, waarbij brandweerkorpsen als launching customer willen fungeren.

- Scenario ontwikkeling voor Twente Safety Campus

## 1. Behaalde doelstellingen

Doelstelling van het project zijn: Oplevering van een sensorkpakket (demonstrator), getest conform operationele omstandigheden. Kennisopbouw detectiemogelijkheden m.b.v. sensoren op een drone en applicatie mogelijkheden hiervan. Mogelijkheden voor commerciële doorontwikkelingen van de demonstrator en Scenario ontwikkeling voor Twente Safety Campus

### Demonstrator

Tijdens het project RPAS meets firefighting<sup>1</sup> is er een demonstrator ontwikkeld tot TRL6 (zie fig. 1). Dit betekent dat de drone met gassensoren en bemonstering getest en zelfs al ingezet is bij oefeningen en operationele inzetten van de Brandweer Twente. De module verstuurt in real-time data van 16 sensoren naar een grondstation waar data wordt weergegeven en geïnterpreteerd wordt naar een stoplichtmodel (groen veilig, oranje risico's/maatregelen gewenst, rood gevaar/ maatregelen onmiddellijk vereist). Dit laatste conform de wensen en eisen van de eindgebruikers. De door ons ontwikkelde software is makkelijk te integreren in andere (bestaande) softwaresystemen die door de brandweer worden gebruikt. De in dit project ontwikkelde monstermethode vangt niet alleen gas en fijnstof op in de lucht, tevens zijn speciale filters ontwikkeld die op de grond verder geanalyseerd kunnen worden (bijvoorbeeld voor asbest onderzoek).



*Figuur 1 Demonstrator ready for take-off op de Twente Safety Campus*

## Kennisopbouw sensoren en drones

Tijdens het project is er kennis vergaard over sensoren en applicatie mogelijkheden in het veld. Ook voor het systeem van eisen voor sensoren onder een drone zijn grote stappen gemaakt. De in dit project ontwikkelde kennis en expertise, wordt verder gebruikt in andere projecten (zoals het EFRO-project UIVER en het TFF-project SDE). Vanwege de grote interesse vanuit de brandweer in het vinden van asbest detectoren, is er ook gezocht naar een detectiemogelijkheid voor asbest. Hierbij is gebruik gemaakt van



*Figuur 2 Foto van eindpresentatie van RPAS meet Firefighting met eindgebruikers*

een techniek dat in een ander TFF-project (Vuurwerk detectie in voetbalstadions) werd ontwikkeld. Samen met het bedrijf Stagegate 11 BV en ACMAA BV is een proof of principle experiment uitgevoerd voor detectie van asbest met behulp van delta-R.<sup>2</sup> Hoewel de laatst genoemde testen tot nu toe niet eenduidig waren, heeft dit wel een verbeterde meetmethode opgeleverd bij StG11. Gezien de complexiteit rondom asbest en het feit dat de Delta-R niet drone compatible is, is besloten deze onderzoekslijn tijdens dit project niet voort te zetten.

## Trainingen Kennisverspreiding en werkgelegenheid

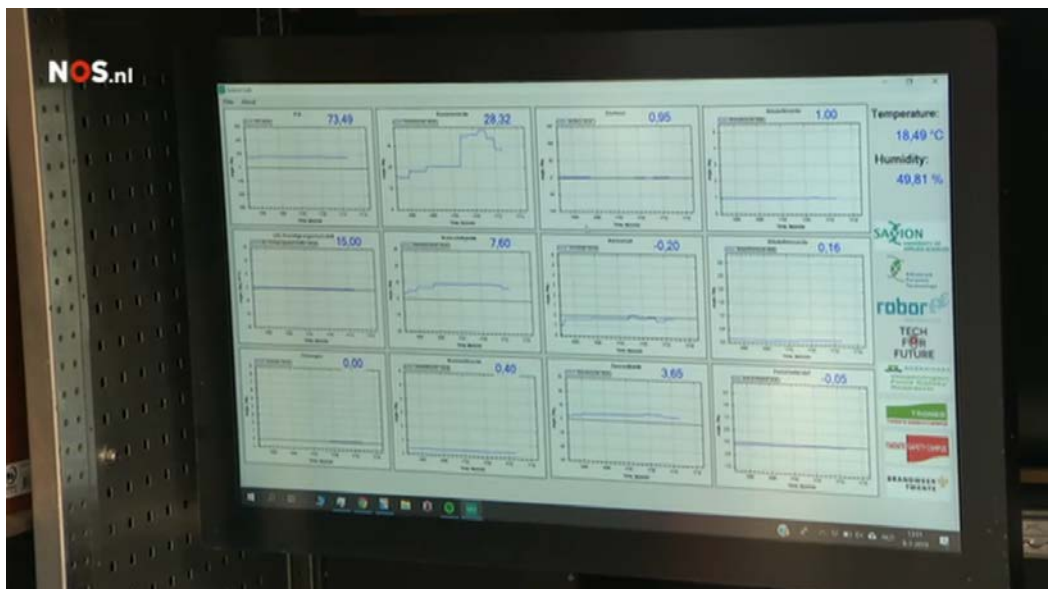
De tijdens het project ontwikkelde scenario's kunnen gebruikt worden voor training en instructie van de drone-teams. Van de/het ontwikkelde demonstrator/ sensorpakket alsmede faciliteiten die de Twente Safety Campus (TSC) biedt, wordt door leden van de kenniskring AFT regelmatig gebruik gemaakt (hetgeen ook correspondeert met het gewenste doel). Zo wordt door collega's van Wageningen Food Safety Research (WFSR) het ontwikkelde sensorpakket gebruikt voor het testen van de verspreiding van de emissies bij branden en de impact hiervan op de voedselketen. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van de faciliteiten die TSC biedt. Tevens maakt de Inspectie Leefbaarheid en Transport (IL&T) gebruik van een sensormodule, die ROBOR Electronics op basis van onze sensoren, heeft ontwikkeld. Daarnaast is er interesse getoond vanuit brandweerkorpsen uit Duitsland (Emmerich en Duisburg).

Tijdens de proof of concept oefening, conform beschrijving PID, is een nieuwsitem gefilmd door RTV Oost en gepubliceerd in dagblad Tubantia.<sup>3</sup> De eindoefening kon ook op behoorlijk wat nieuwswaarde rekenen. Het NOS Journaal, Jeugdjournaal, RTV Oost en dagblad Tubantia besteedden aandacht aan de in dit project ontwikkelde "snuffeldrone".

Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

Pagina 8 van 26

Robor Electronics BV heeft de binnen het project ontwikkelde module momenteel in gebruik, voor toepassingen binnen het taakgebied van het RIVM en NVWA (zoals post incident impact op de voedselketen), de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) voor inspectie van schepen voor detectie van het gebruik van illegale stookolie, de Brandweer Twente gebruikt de demonstrator tijdens de klussen waar de brandweerdrones operationeel wordt ingezet. De wens is groot om een commercieel eindproduct op te leveren. Hierover worden met meerdere partijen gesprekken gevoerd.



***Figuur 3** Screenshot van NOS-journaal tijdens item over Project RPAS meets Firefighting*

Tijdens het project zijn de onderzoeksresultaten op meerdere congressen en evenementen gedeeld, zoals een Seminar Opsporing & Innovatie op de Politieacademie te Apeldoorn, open-dag Technology Base Twente <sup>4</sup> (10.000 bezoekers), International drone week, IFV-seminar drone vliegen voor Brandweer, Politie en Defensie.

Het eindevenement heeft daarnaast interesse gewekt bij zowel publieke als private partijen: de Bedrijfsbrandweer van Chemelot, Soundforce One, (milieu inspectie), IL&T, RIVM en verschillende brandweerkorpsen.<sup>5</sup>



## 2. Resultaten en kwaliteit

Het project was opgedeeld in 4 fases. Fase 1 is welke gevaarlijke stoffen willen meten en met welke techniek. Fase 2 is de proof of concept fase waarbij gekeken wordt wat de invloed van de drone is. Fase 3 worden de eerste veldtesten uitgevoerd met de demonstrator. In fase 4 wordt de demonstrator ingezet in een relevant en reëel scenario.

### Fase 1 Welke stoffen meten met welke technieken?

Het doel van fase 1 is onderzoeken welke stoffen er vrijkomen tijdens een brand en op welke stoffen wij ons in dit project gingen focussen. Bij elke brand komen immers gevaarlijke stoffen vrij en deze lijst is bijna eindeloos te noemen. Er moesten keuzes worden gemaakt. Hierbij was het niet alleen relevant om te bepalen welke stoffen, maar ook in welke concentraties we de stoffen kunnen/ willen meten. In samenspraak met de stuurgroep, aangevuld met een aantal externe partners (RIVM, IL&T, Universiteit Wageningen, NVWA) en een afvaardiging van de Adviseurs Gevaarlijke Stoffen en brandonderzoekers van de Brandweer Twente, is een top 20 tot stand gekomen van de meest toxische stoffen die vrij kunnen komen bij een brand. Bij de totstandkoming van deze top 20 is ook rekening gehouden met toekomstige incidenten (zoals brand met een elektrische auto). Nadat besloten was op welke stoffen we ons in dit project gingen concentreren en welk bereik de sensoren moesten hebben, kon er gekeken worden welke type sensoren (commercieel verkrijgbaar) voor deze specifieke taak geschikt waren en tevens drone compatible zijn (klein en licht). Al de gekozen sensoren werden eerst individueel getest in een laboratoriumopstelling en geëvalueerd, alvorens in meer realistische omstandigheden getest te worden. De gekozen sensoren werden individueel geëvalueerd op hun specifieke nauwkeurigheid en gevoeligheid voor operationele omstandigheden<sup>1</sup>.

Daarnaast is er uitgebreid literatuuronderzoek gedaan naar emissies bij branden en de toxicologie hierachter. Na gesprekken met de eindgebruiker zijn er prioriteiten gesteld en randvoorwaarden besproken.

Belangrijke randvoorwaarden van de eindgebruiker zijn:

- *Implementatie met huidige drone platform van de brandweer (DJI MH-100). Deze drone heeft een draagcapaciteit van max 1 kg.*
- *Een user-interface die interpreteerbaar is door mensen met MBO werk- en denkniveau; bij voorkeur een stoplicht model waarbij groen 'all clear' is, oranje 'aanwezig' en rood aanwezig in een gevaarlijke concentratie is.*
- *Het systeem moet betaalbaar blijven voor implementatie met landelijke dekking in combinatie met het MH-100 droneplatform.*

---

<sup>1</sup> In detail verantwoording is beschikbaar in het design doc.<sup>6</sup>

Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

Pagina 10 van 26

- *Future-proof: Het systeem moet rekening houden met nieuwe ontwikkelingen en materialen. Hieronder vallen Lithium batterijen met autobranden en nieuwe bouwmaterialen zoals verschillende soorten isolatie: polystyreen en polyurethaanschuimen.*
- *Real-time: In eerder onderzoek door RIVM hadden de sensoren een respons tijd van 5 minuten<sup>7</sup>. Dit is te langzaam voor implementatie in de brandweer praktijk<sup>2</sup>.*

Waterstofcyanide	Chloorgas	Kooldioxide	tolueen-di-isocynaat
Fluorwaterstof	Koolmonoxide	Lower explosive limit	Fluorwaterstof
Stikstofoxide	Zuurstof	Organische stoffen	Aromaten
Zwavedioxide	Stikstofmonoxide	Fijnstof	Alcoholen
Zoutzuur	Fijnstof	Ketonen/aldehyde	Afatische koolwaterstoffen
Zwavelwaterstof	Ammoniak	Fosfine	Chloreerde koolwaterstoffen
Ammoniak	Fosgeen	Fosgeen	<sup>2</sup> Asbest

**Figuur 4** Tabel met de stoffen gekozen door de stuurgroep voor verdere ontwikkeling onder een drone

De gekozen technieken zijn sensoren, waaronder elektrochemische en katalytische gassensoren die de geselecteerde gassen kunnen meten/detecteren. Zie ook bovenstaand fig. 4

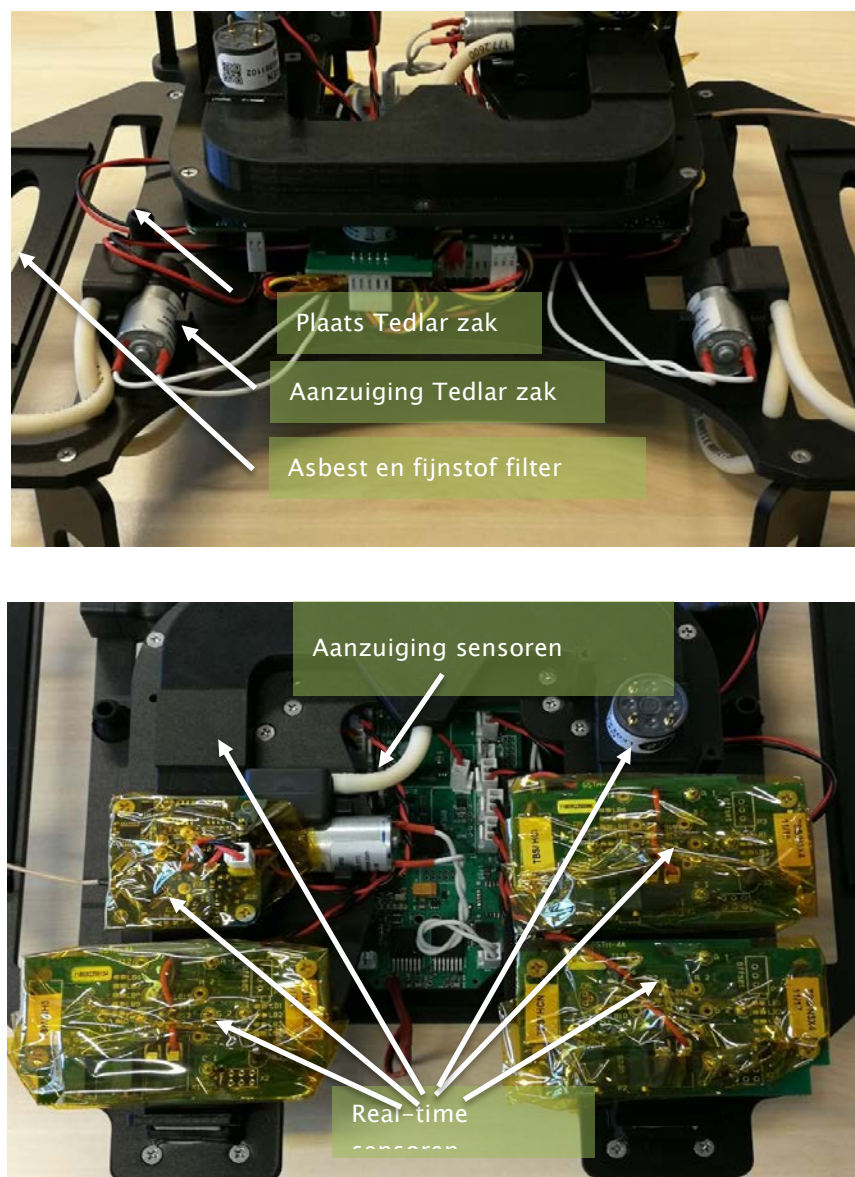
---

<sup>2</sup> Tijdens fase 1 is ook gesproken over de mogelijkheid om asbest te detecteren. Zoals aangegeven hebben we tijdens dit project hier wel aandacht aan besteed (in samenwerking met bedrijf Stagegate11 een ACMAA BV), maar is in de stuurgroep besloten dat dit vraagstuk te complex is, waardoor het buiten de scope van het project viel. De aanbeveling werd gedaan om hier een apart project voor op te starten.

Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

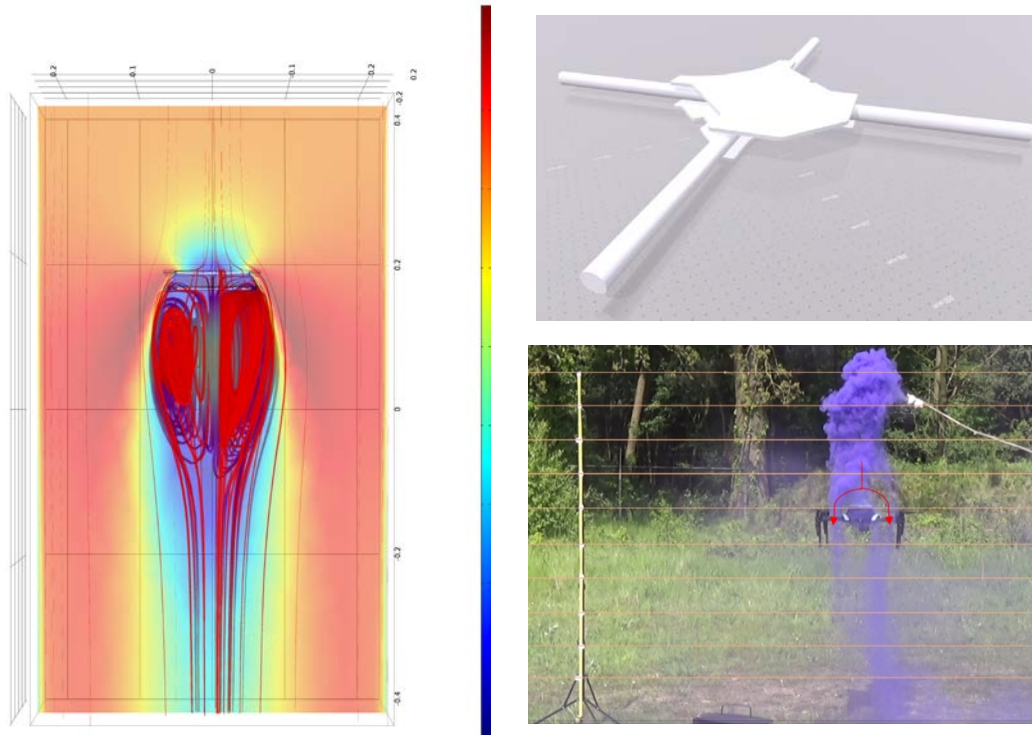
Pagina 11 van 26

Deze sensoren (fig. 4) werden aangevuld met een PID en LEL-sensoren die het algemeen gehalte van vluchtig organische stoffen kunnen meten.<sup>8</sup> Als extra werd besloten om ook de huidige meettechniek, de zogenoemde gasmeetbuizen (die het gehalte van voornamelijk organische stoffen meten) aan het pakket toe te voegen. Met dit laatste kan eventuele overgang vanuit de potentiële eindgebruikers mogelijk versoepeld worden. Daarnaast zijn gas en stof opvang toegevoegd voor forensische toepassingen, validatie en bewijswaarde



**Figuur 5** Foto's van de demonstrator module met real-time sensoren en gas en stof opvang (fase 3 en 4)

## Fase 2 kun je giftige stoffen meten m.b.v. een drone?



**Figuur 6** Links airflow analyse (COMSOL) met luchtdruk map bij airflow gegenereerd door de propellers Rechtsboven Model wat gebruikt is bij airflow analyse **Rechtsonder** Airflow analyse gedaan met parse rook (overlay Lijn elke 20cm)

In fase 2 stond de vraag centraal hoe de geselecteerde sensoren met behulp van een drone metingen kunnen verrichten in een rookwolk. Wat zegt dat over het systeem van eisen? Op welke plek moeten de sensoren geplaatst worden?

Om op deze vragen antwoord te krijgen, is er niet alleen literatuuronderzoek gedaan en werd er gesproken met experts, tevens zijn er 3d modellen gemaakt over de airflow rondom de drone met behulp van Comsol multiphysics.<sup>9</sup> Hierbij is gekeken naar hoe homogeen de luchtstroom is, en de inzuighoogte van de luchtstroom door de propellers (fig. 6).

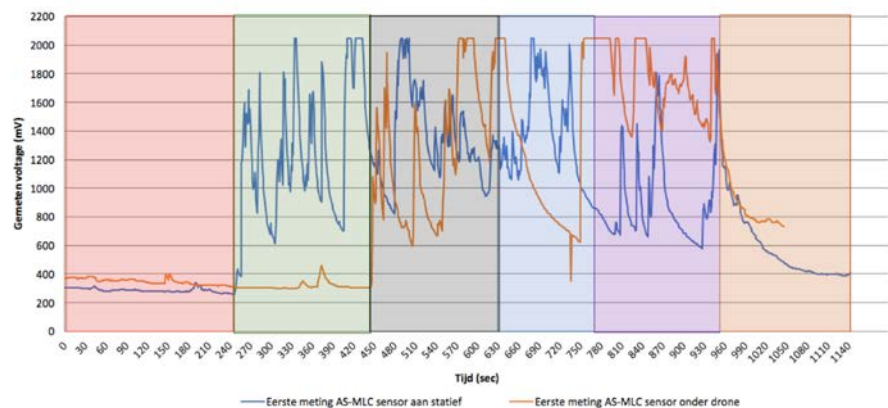
Airflow rondom de drone zorgt voor een homogenisatie van stoffen en dus een 'gebied-representatieve' waardes van sensoren bij grote gaswolken. Simulatie van de airflow is gedaan door Beverborg<sup>10</sup>. Uit deze analyse kwam de exacte locatie van het sensorpakket naar voren, waarbij de te meten stoffen niet werden verspreid door de rotoren (hetgeen door critici werd opgemerkt), maar de stoffen juist specifiek langs de sensoren werden geleid. Wel was de downflow dusdanig krachtig, dat we speciale filters voor de sensoren moesten plaatsen om deze niet te snel verstopt te laten raken. Bijkomend voordeel, de filters kunnen

## Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

Pagina 13 van 26

gebruikt worden voor extra analyse in een laboratorium, hetgeen positief is voor de forensische toepassingsmogelijkheden.

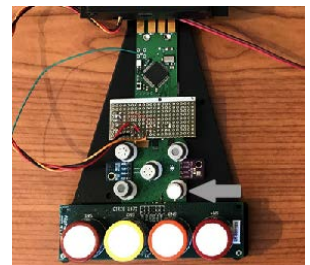
Tijdens fase 2 zijn eerst labtesten en vervolgens praktijk proof of concept experimenten uitgevoerd. Dataverwerking is gedaan door Slomp<sup>8</sup>. Korte conclusie van versie 1 van real-time sensoren is dat het mogelijk is om met behulp van een drone, voorzien van sensoren emissies bij branden te meten. (Fig. 7 en 8) Wel werd duidelijk dat roetvorming en vervuiling voor problemen kunnen



**Figuur 7** *blauwe lijn* sensor op drone *oranje lijn* sensoren op statief **Groen** Rook meting alleen met sensor aan het statief, sensor onder de drone vliegt nog op de plek van de nulmeting Grijs Allebei de sensoren doen de eerste meting in de rook. **Blauw** Drone vliegt naar tien meter zodat er van plek gewisseld kan worden. **Paars** Allebei de sensoren doen de tweede meting in de rook **Oranje** Sensoren uit de rook gehaald en opnieuw een nulmeting

zorgen.

Niet alleen vanuit wetgeving gezien (buiten zicht van de piloot), maar ook de sensoren kunnen vervuild raken. Als dit laatste gebeurt, meten de sensoren niet de juiste waarden. De issues rondom wetgeving hebben we buiten dit project gehouden. Daarover wordt op politiek/bestuurlijk niveau stevig van gedachten gewisseld, waarbij Europese wet- en regelgeving in de toekomst positieve mogelijkheden biedt<sup>11</sup>.



**Figuur 8** real-time sensoren zonder vaste aanzuiging gebruikt tijdens experiment in fig. 7



Het systeem van eisen rondom de sensoren werden aangescherpt, n.a.v. deze experimenten. Om een representatief beeld te geven van de gaswolk is er een vaste aanzuiging nodig, Wind en rotorsnelheid hebben namelijk invloed op de blootgestelde sensoren. Na dit experiment is er gekozen om de sensoren een vaste aanzuiging te geven en het roet te filtreren met behulp van wegwerpfilters.

Tijdens de experimenten werd het fenomeen kalibratie een extra issue. De gekozen sensoren zijn voorzien van fabriekskalibratie, maar voor herhaaldelijk gebruik dienen de sensoren op termijn opnieuw gekalibreerd te worden. Dit laatste brengt extra kosten met zich mee m.b.t. een eventueel eindproduct. Literatuuronderzoek leerde dat er voor kalibratie verschillende technieken bestaan (zie Nijmeier<sup>12</sup> en Blok<sup>13</sup>). Beide onderzoekers waren betrokken bij het project en hebben uiteindelijk voor een kruis-kalibratietechniek gekozen die op een makkelijke manier uit te voeren en later ook te integreren is in de dagelijkse praktijk van de brandweer. Deze stap is cruciaal omdat je met kalibratie vaststelt of de sensoren meten wat van belang is en de juiste waarden aangegeven worden. Kruis-kalibratie maakt gebruik van de lichte kruisgevoeligheid van sensoren.<sup>3</sup>

### Gasmeetbuizen

Om de overgang vanuit de eindgebruikers te versoepelen is ook gekeken in hoeverre bestaande meettechnieken gecombineerd kunnen worden met een drone. De brandweer gebruikt op dit moment gasmeetbuizen voor metingen op leefniveau om vast te stellen of er en welke gassen vrijgekomen zijn tijdens een brand en wat het verspreidingsgebied ervan is.<sup>14</sup> Deze gasmeetbuizen meten 5 subgroepen organische stoffen en geven dus richtinggevende informatie. In deze fase hebben we een device ontwikkeld, waarin de gebruikte gasmeetbuizen in een aaneengesloten houder zijn geïntegreerd met daarin een camera en een lichtbron (fig. 9).



**Figuur 9** *real-time* beeld van gasmeetbuizen tijdens vlucht.

---

<sup>3</sup> Deze kruisgevoeligheid is vastgesteld door de fabrikant. Dit geeft een mogelijkheid om de kosten van kalibratie te drukken. Dit door met minder stoffen en mogelijk minder gevaarlijke/reactieve stoffen te kalibreren.

Met dit ontwikkelde device is het mogelijk om de gasmeetbuisjes aan een drone te koppelen en tijdens de vlucht de meetwaarden van de gasmeetbuisjes te analyseren. Tijdens een lab-test is het kleurherkenningssysteem getest, welke verder ontwikkeld kan worden (een systeem dat dit automatisch in gevaarlijk of niet gevaarlijk advies omzet).<sup>14</sup>



**Figuur 10 Gasmeetbuizen** van testvlucht met gemeten stofgroepen ketonen en alifaten (groen). Dit komt overeen met verwachtingen vanuit de literatuur<sup>24</sup>

Het gewicht van deze module is echter significant. Het zou lichter gemaakt moeten worden, om in combinatie met grote hoeveelheden gassensoren te kunnen worden gebruikt. Gezien dit nadeel is niet gekozen voor de verdere ontwikkeling.

### Fase 3 Veld testen

In fase 3 werden er veldtesten uitvoeren met de eindgebruiker. En een weergave van de gekozen sensoren voor de demonstrator

De grootste beperking tijdens de experimenten in fase 3 en 4 van het project is veiligheid. We focussen ons immers op gevaarlijke stoffen. Experimenten met bijvoorbeeld koolstofmonoxide of isocyanaten, kunnen niet zonder extreme veiligheidsmaatregelen plaatsvinden. Aan deze maatregelen zit een grote hoeveelheid tijd, geld en mankracht verbonden. Er is getracht bestaande faciliteiten te vinden om deze experimenten zoals kalibratie van gassensoren en werken met asbest te testen. In de aanbevelingen zullen verschillende soorten partners worden benoemd die kunnen helpen bij het uitvoeren van deze experimenten.

Experimenten in fase 3 en 4 zijn uitgevoerd op de Twente Safety Campus (TSC) ontwikkeld en opgesteld in samenspraak met eindgebruikers, gebruikmakend van faciliteiten van TSC. Scenario's in de Brandonderzoeks- en Brandoefengebouwen gaven hierbij mogelijkheden tot realistische brandscenario's.



***Figuur 11** Eindoefening die plaatsvond op Twente Safety Campus*



## Realtimesensoren in demonstrator en 20 gevaarlijkste stoffen

Stof	Soort sensor	demonstrator	TRL	Bereik (PPM)	20 gevaarlijkste stoffen
Waterstofcyanide	electroche mischsensor	✓	6	0-50	✓
Fluorwaterstof	electroche mischsensor	✓	6	0 – 200	✓
Stikstofoxide	electroche mischsensor	✓	6	0-200	✓
Zwavedioxide	electroche mischsensor	✓	6	0-100	✓
Zoutzuur	electroche mischsensor	✓	6	0 – 200	✓
Zwavelwaterstof	electroche mischsensor	✓	6	0-50	✓
Ammoniak	electroche mischsensor	✓	6	0-1000	✓
Chloorgas	electroche mischsensor	✓	6	0-20	✓
Koolmonoxide	electroche mischsensor	✓	6	0 to 5,000	✓
Zuurstof	electroche mischsensor	✓	3	0-21%	
Stikstofmonoxide	electroche mischsensor	✓	6	0 – 250	✓
Fijnstof	filter	✓	6		
Asbest	Haalbaarheid onderzoek/ filter		3		✓

Stof	Soort sensor	demonstrator	TRL	Bereik (PPM)	20 gevaarlijkste stoffen
Kooldioxide	infra-rood sensor	✓	6	0 to 5 % vol	
Lower explosive limit	infra-rood sensor	✓	6	0	✓
Organische stoffen	Ultra-Violet sensor	✓	6	10.6 eV (LLHS)	✓
Fijnstof	dynamic light scattering		5		
Ketonen/aldehyde	Gasmeetbuis		5	1000-5000	✓
Fosfine	Gasmeetbuis		2	0.1-2.5	
Fosgeen	Gasmeetbuis		2	0.05-2	✓
tolueen-di-isocynaat	Gasmeetbuis		2	0.02-0.2	✓
Fluorwaterstof	Gasmeetbuis		2	0.5-15	✓
Aromaten	Gasmeetbuis		5	100-500	✓
Alcoholen	Gasmeetbuis		5	200-1000	✓
Afatische koolwaterstoffen	Gasmeetbuis		5	50-100	✓
Chloreerde koolwaterstoffen	Gasmeetbuis		5	50-100	✓

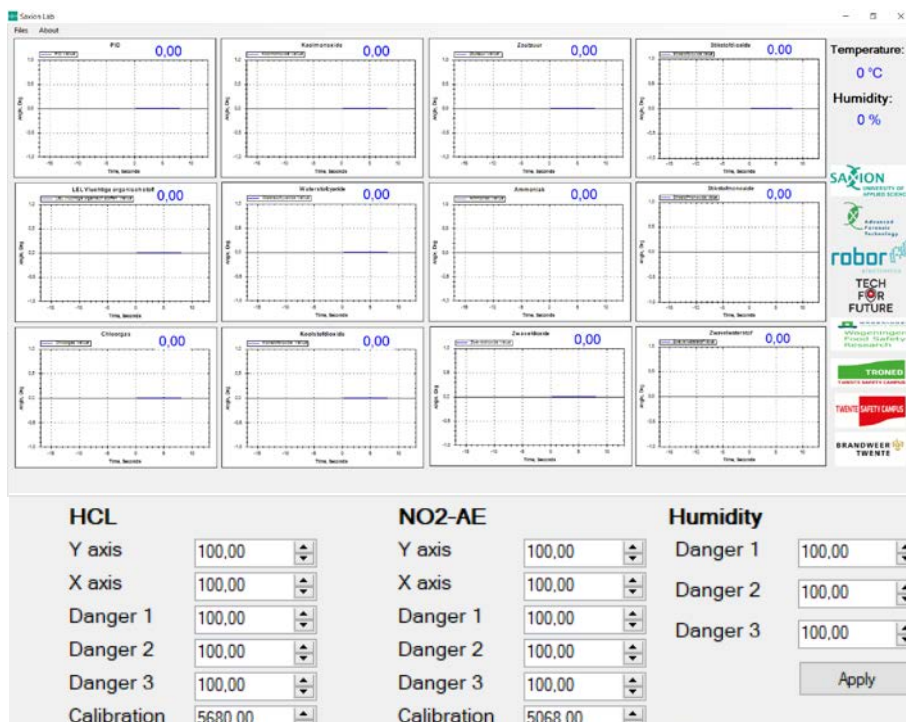
**Figuur 12** Overzicht van te meten stoffen met hun technieken en meetbereik inclusief 20 gevaarlijkste stoffen

Als sensoren een betrouwbare meetwaarde kunnen geven, dienen de sensoren vooraf gekalibreerd te worden. Sensoren die gebruikt zijn tijdens het project zijn conform fabrieksinstellingen gekalibreerd en vanwege kostentechnische redenen is ervoor gekozen deze sensoren tijdens de experimentele fase niet opnieuw te kalibreren. Selectie van de gassensoren is gedaan aan de hand van rapporten van Slomp<sup>8</sup> Mombarg<sup>15</sup> Neijmijer<sup>12</sup> en Blok<sup>13</sup>. Uiteindelijk zijn we op twee fabrikanten uitgekomen: Alphasense en Membrapor. Weergave van de technieken en hun bereik zijn weergegeven in fig. 12. Naast deze sensoren worden temperatuur en luchtvochtigheid ook gemonitord om de veiligheid van de RPAS en het sensor pakket te bewaken. De sensoren worden aangezogen en gefilterd door PUF-schuim voor het schoonhouden van de sensoroppervlaktes.

Helaas is het niet mogelijk om alle gevaarlijke stoffen real-time te meten die bij een brand vrijkomen.<sup>6</sup> Een van de manieren waardoor we dit proberen te ondervangen is met bemonstering van gas en stof opvang. Deze opvang methodes kunnen ook gebruikt worden forensische doeleinden.

## Software en real-time data: Stoplichtmodel

In deze fase verder met de sensoren, maar nu dus ook in staat om aan een andere wens van de opdrachtgever gehoor te geven, namelijk monstermethode + interpretatie van de data in het stoplichtmodel. Voor dit laatste is specifieke software ontwikkeld, waarbij de grenswaarden (groen, oranje, rood) zijn afgestemd op de concentratie van de geselecteerde stof. Gezien de aanbeveling van een RIVM-haalbaarheidsstudie, dient de meetwaarde real-time gegenereerd te worden. Dit laatste hebben we weten te realiseren door een LORA-netwerk te bouwen, waarbij de sensordata elke 1.35 seconde wordt verstuurd naar een basestation. Dit genereert real-time data en zorgt ervoor dat het platform onafhankelijk en flexibel ingezet kan worden gedurende het onderzoek. Bij versie 1 van de software is de data verstuurd naar Excel. Tweede versie van de software is gebouwd in C# schrijft de data automatisch naar een archief weg in CSV format.<sup>16</sup> Remote Read-out van gasmeetbuizen gebeurt via wifi 2.4Ghz.<sup>17</sup>



**Figuur 13 Boven** Weergave van real-time sensor data **Onder** Instelbare waarden voor verschillende gevaar niveaus

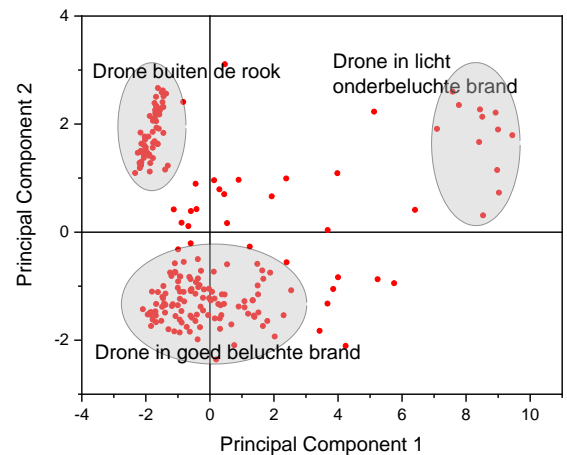
De ontworpen software geeft alle data individueel weer in een interactieve grafiek, en heeft per stof 3 instelbare alarm niveaus. Als een waarde bereikt wordt, dan verschijnt er een pop-up (waarbij de sensorbediener een conformatie ontvangt dat hij de waarde van bijvoorbeeld een alarmeergrens heeft bereikt). De standaard ingestelde waarden zijn de interventie-waarden aangegeven door het RIVM.<sup>18</sup>

## Grote schaal houtbrand

Beschrijving van dit scenario is te vinden in inhoudelijk document<sup>18</sup>. In het kort is hier sprake van een pallet (1 m<sup>3</sup>) brand in semi afgesloten ruimte.

Zoals verwacht gaven de sensoren een significante uitslag bij koolstofmonoxide en bij de PID bij een pallet brand. Andere sensoren laten wat variatie zien door temperatuur- en lichte kruisgevoeligheid. Maar blijven relatief stabiel waarbij zoutzuur de grootste negatieve uitslag heeft met -4 PPM. Omdat er twee fases van brand visueel zijn waargenomen, licht onder belucht en belucht, is er getracht onderscheid hierin te kunnen maken met behulp van principal component analysis. Hier is een PCA plot uitgekomen waarbij 71 procent van de variatie in de data wordt weergegeven. De gebieden zijn handmatig omringd om de mogelijkheid van simpele data weergave te laten zien. Dit geeft mogelijkheden om een algemeen stoplicht model te maken van de data in plaats van de individuele grenswaardes als limiet te gebruiken.

Sensoren functioneren zoals verwacht en functioneren bij een simulatie kleine huisbrand. Aan de hand van deze test zijn er verbeteringen aangebracht in de bevestiging van de gas-opvangzakken.

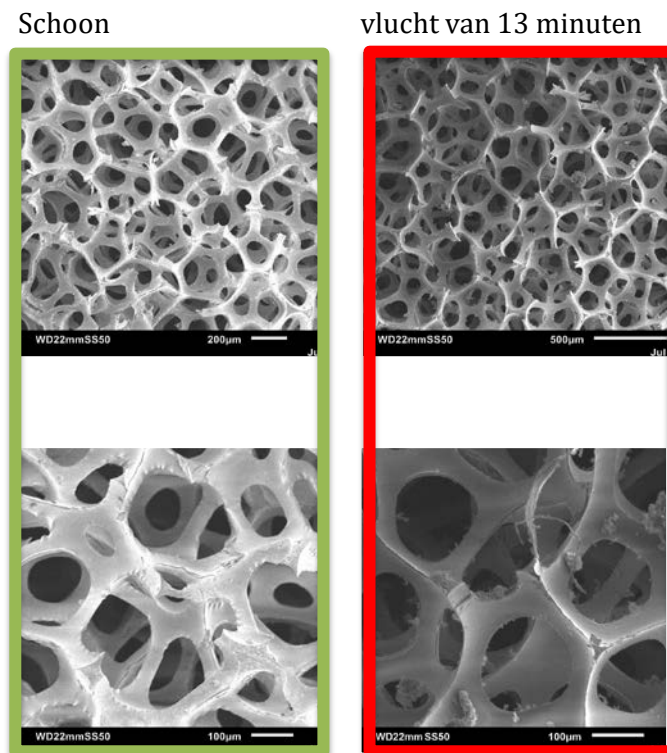


**Figuur 14** PCA plot van die de mogelijk laat zien om onderscheid te maken tussen verschillende brand omstandigheden

## Fijnstof en mogelijke asbest opvang

Het snel kunnen vaststellen of er asbest vrij komt bij een brand is een grote wens van de brandweer. Zoals benoemd in fase 1 is on drone real-time asbest detectie nog niet mogelijk, Hier zou een apart project van gemaakt moeten worden inclusief een kosteneffectieve on-site analyse. De module die we nu gebruiken vangt fijnstof op, waar asbest een subcategorie van is. Deze module maakt gebruik van de rotor airflow om lucht door een PUF-filter te blazen.

De filters kunnen daarna gebruikt worden voor on-site onderzoek. 'Na inzet van de PUF-filter tijdens het brand scenario zijn de PUF-filters geïnspecteerd door middel van SEM (elektronenmicroscopie)



**Figuur 15** Sem beelden van PUF Filters **Links** Schoon **Rechts** na testvlucht met zichtbare roetdeeltjes

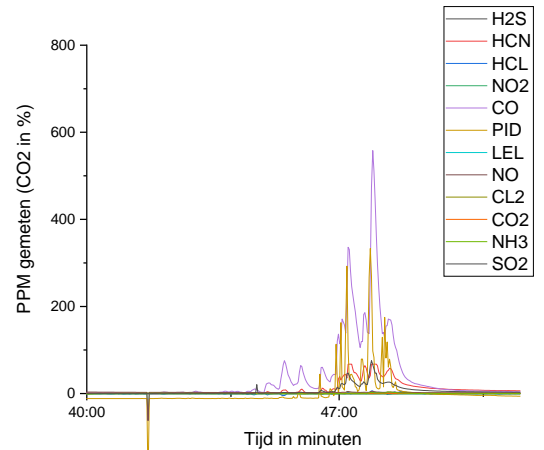
Voor schoon filter materiaal is het afgedekte materiaal gebruikt wat niet is blootgesteld is aan stof, maar wel een natuurlijke achtergrond heeft van handeling. Er zijn geen zichtbare roetdeeltjes gevonden op 10mm<sup>2</sup> (fig. 15.) Daarnaast zijn ook 10mm<sup>2</sup> na vlucht beelden geanalyseerd (fig. 15) Het beeld laat klein geleidende fijnstof deeltjes zien die verspreid zijn door het hele PUF-filter.

#### Fase 4 Een echt scenario: huiskamerbrand

Voor fase 4 hebben we de demonstrator ingezet bij een relevant en realistisch scenario, een huiskamerbrand.

Tijdens het scenario huiskamerbrand <sup>19</sup> waarbij sprake is van een typische huiskamerraad inclusief banken stoelen, huiskleed etc. met veel synthetische stoffen in bijvoorbeeld stoelen en banken, is er gemeten met de demonstrator. Alle sensoren zijn binnen bereik gebleven. De koolstofmonoxide sensor heeft 480 Part per milion (PPM) gemeten. Deze piekwaarde overstijgt de Alarmeringsgrenswaarde (AGW) en Levensbedreigende waarde (LBW) <sup>18</sup>

Dit betekent als deze waarde consistent gemeten zou worden dat het gebied ontruimd moet worden en daar verblijven dodelijk zou zijn. **Deze test bewijst dat de drone veilig de AGW-waardes kan meten en dat het sensorpakket hier ook geschikt voor is.** De temperatuur van de sensor bereikt hier niet een kritisch punt van 40 graden en blijft onder 30 graden waardoor er veilig gevlogen kan worden. <sup>20</sup>



**Figuur 16** Sensor data tijdens een huisbrand die waarbij de demonstrator een dodelijke hoeveelheid koolstofmonoxide detecteert

#### Gasbemonstering door middel van tedlar zakken

De ontwikkelde gasbemonstering methode kan gebruikt worden voor een uitgebreidere analyse op het laboratorium of in het veld met bijvoorbeeld GC-MS of IMS. Ook kan er met gasmeetbuizen op een veilige afstand gemeten worden. Voor de monsterneming van organische stoffen worden er Tedlarzakken gebruikt. De zakken zijn inert, laten geen vluchtige organische stoffen door. Ze zijn licht en disposable om kruiscontaminatie te voorkomen. Door het RIVM/MOD wordt de brandweer gestimuleerd deze tedlarzakken in te zetten bij complexe branden.

## Experimentele validatie brand componenten: Tedlar zakken

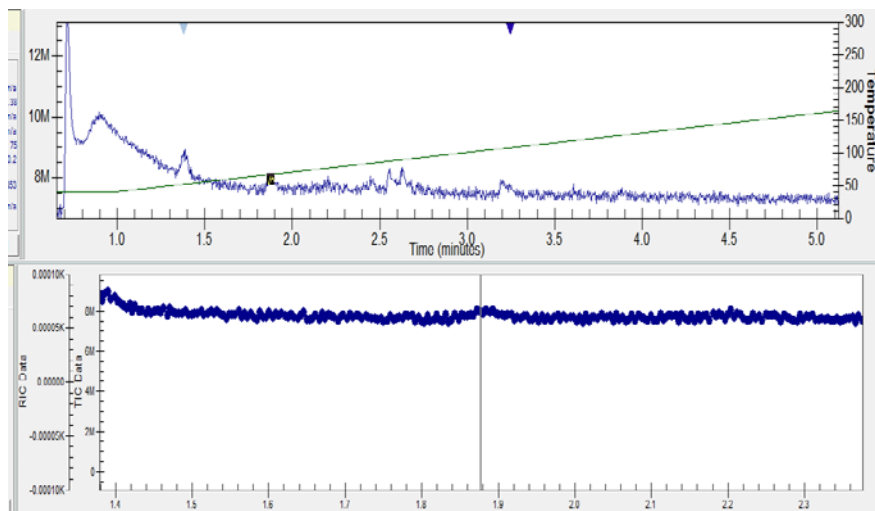
In dit experiment zijn componenten gedetecteerd die volgens de literatuur ook vrij zouden moeten komen. Het test materiaal, een 2x2m piepschuim paneel met een dikte van circa 30 cm, werd bedekt met “dakleer”, een synthetisch rubber materiaal om industriële brand te simuleren. Monsters zijn gemeten met een mobiele GCMS van WFSR.

Gevonden componenten bij deze twee metingen zijn benzeen, toluen, styreen. Deze componenten komen in significante proporties vrij bij pyrolyse/branden van piepschuim. Octamethylcyclotetra-siloxane wordt gebruikt als additief in rubber<sup>21</sup>, maar kan ook mogelijk uit de siliconen aanzuig-slang komen. Oplossing is inerte materiaal te gebruiken voor de aanzuigslang, zoals fluoroplastics. De componenten zijn gedetecteerd in beide tedlar-zakken.



**Figuur 17** brand met piepschuim isolatie simulerend een industriële brand

In tegenstelling tot het RIVM-rapport<sup>7</sup> hebben we componenten kunnen detecteren die afkomstig zijn uit de bron van de brand. Dit is gebeurd met onderbeluchte brand, waar hevige rook vanaf kwam. Onze hypothese is dat dit een essentiële experimentele factor is die representatief is voor een grootschalige brand. Dit komt ook overeen met het RIVM rapport<sup>22</sup> want alle gebouwbranden zijn onderbelucht. Tijdens de originele haalbaarheidsstudie is er gebruik gemaakt van droge pallets in een open ruimte dit zorgt voor een completere verbranding en minder vluchtige stoffen in de lucht.



**Figuur 18** Meting van tedlar-zak bij piepschuimbrand (fig. 17) waarbij de componenten van de brand zijn gedetecteerd op een mobiele GC-MS Benzeen 1.38 min, Toluene 1.88 min, Styreen 2.62 min, Octamethylcyclotetra-siloxane

### 3. Kosten

Zie het bijgevoegde financieel eindrapport.

### 4. Planning

Wegens weeromstandigheden waarbij de drone niet mag vliegen, zoals bij neerslag, harde wind en onder nul graden Celsius, hebben we vertraging in het project opgelopen. Inhoudelijk heeft de planning niet afgeweken, behalve dat grootschalige verspreiding niet veilig getest kan worden op TSC. Fase 1 heeft overlap gehad met Fase 2 omdat de literatuur het nog niet eens is over welke stoffen het meest gevaarlijk zijn voor first-responders. Uiteindelijk is hier een gezamenlijke hamerslag op gegeven en een keuze gemaakt.

### 5. Conclusie en aanbevelingen

We hebben bewezen dat het mogelijk is om real-time gevaarlijke gassen te meten in relevante concentraties met behulp van een drone. Daarnaast hebben we een veelzijdig pakket aan mogelijkheden neergezet en een grote variatie aan scenario's onderzocht. Onderzoek dat nog uitgevoerd kunnen worden is data-analyse van echte scenario's in de praktijk. Hierbij kun een chemische vingerafdruk nemen van verschillende soorten branden mbv. E-nose principe. Hiervoor heb je geen gekalibreerde sensoren nodig. Dit zou de onderhoudskosten significant verlagen. Ook geeft een chemische vingerafdruk een beter beeld dan individuele grenswaardes omdat giftige stoffen samen gevaarlijker kunnen zijn. Dit kan gebeuren doordat het de intentie van de Brandweer Twente is om het pakket ook in te zetten bij grote incidenten.

Verdere aanbevelingen zijn:

- Verdere ontwikkeling van het gasmeetbuizen systeem.
- Verdere validatie van de real-time gassensoren door analyse van de tedlarzakken op permanente gassen. (M.b.v. GC-TCD met het lectoraat Duurzame energie).
- Integratie van fijnstof en straling sensor in het huidige pakket.
- Betere software ontwikkelen voor verspreiding van gaswolken en interpretatie, waarbij alle geïnteresseerde partijen input mogen geven over hun behoeftes.
- Voor de brandweer de data zichtbaar maken in de huidige AGS app, en iPad compatibiliteit ontwikkelen.
- De wensen van IL&T en WFSR en mogelijk RIVM, MOD, Politie en geïnteresseerde commerciële partijen inventariseren.
- Aanbevelingen voor commercialisatie zijn laten explosieveilig (ATEX) gecertificeerd en de nodige aanpassingen hiervoor te doen. Daarnaast het lichter maken van het huidige sensor pakket.

Eindrapport Project: RPAS meet Firefighting

Pagina 24 van 26

- Coöperatie opzoeken met sensor fabrikanten Alphasense, Membrapor, Draeger of Honeywell. Dit soort bedrijven hebben veel interne expertise en kunnen aanpassingen maken in de elektronica en in mechanische onderdelen om het gewicht verder te reduceren. Ook hebben ze naar alle waarschijnlijkheid interne gas kalibratie labs, waar de partners gebruik van kunnen maken.
- Marktonderzoek voor de commerciële haalbaarheid van het product, afzetmarkt en commerciële prijs. En daarbij meenemen de environmental monitoring markt, bedrijven zoals Soundforce One en Witteveen en Bos.

## 6. Leerpunten

Van novel idee naar demonstrator binnen een tweejarig project met wetenschappelijke verantwoording in een nieuw veld was ambitieus; er moesten soms compromissen gesloten worden. Ook focus en afbakening moet van tevoren besproken worden. Dit moet duidelijk overlegd en gecommuniceerd worden met de partners.



- (1) Knotter, J. *27032017PID TFF RPAS Meet Fire Fighting DEFINITIEF*.
- (2) Van etten, J. *SG11 Asbest Experiments 31-05-2018*.
- (3) Rook bij brand gevaarlijk? 'Snuffel'-drone van de toekomst weet het direct <https://www.rtvoost.nl/nieuws/271534/Rook-bij-brand-gevaarlijk-Snuffel-drone-van-de-toekomst-weet-het-direct> (accessed Sep 28, 2019).
- (4) Eerste open dag Technology Base in Enschede trekt veel bezoekers <https://www.rtvoost.nl/nieuws/298706/Eerste-open-dag-Technology-Base-in-Enschede-trekt-veel-bezoekers> (accessed Nov 8, 2019).
- (5) Willems, J. Literatuur- en modelstudie naar opnameroutes van toxische stoffen in rook door brand <https://www.ifv.nl:443/kennisplein/arbeidsveiligheid-arbeidshygiene/publicaties/literatuur-en-modelstudie-naar-opnameroutes-van-toxische-stoffen-in-rook-door-brand> (accessed Nov 7, 2019).
- (6) Jansen, L.; Veenstra, R. TFF RPAS Meet Firefighting Design Document. *Design* **2015**, No. February, 1–18.
- (7) Haalbaarheid gebruik onbemande meetvliegtuigjes bij calamiteiten | RIVM <https://www.rivm.nl/publicaties/haalbaarheid-gebruik-onbemande-meetvliegtuigjes-bij-calamiteiten> (accessed Nov 12, 2019).
- (8) Slomp, C. Rpas Meet Fire-Fighting Analyse. **2017**, 35.
- (9) Mombarg, R. RPAS Meet Fire-Fighting Detectie van Gevaarlijke Gassen Bij Branden Onderzoeksrapport. **2017**, 35.
- (10) Grote beverborg, J. *Drone Airflow*.
- (11) Jager, W. de. EU droneregels: in welke (sub)categorie kom je op 31 december 2020 terecht? *Dronewatch*, 2020.
- (12) Nijmeijer, S. DRONE MEET FIRE-FIGHTING Het Kalibreren En Valideren van Elektrochemische Gassensoren Voor Gebruik Op Een Drone.
- (13) Blok, C. *Christel Blok, Stage Verslag, Inzetbaarheid van Drones Bij de Brandweer*.
- (14) Schuit, H. *Gasmeetbuizen in de Lucht*; 2017.
- (15) Mombarg, R. 'RPAS Meet Fire-Fighting' Sensorkeuze Voor Specifieke Gassen Adviesrapport.' **2017**.
- (16) Rangelov, D. *Mitkor2/Saxion\_Lab\_WindowsApp*; 2019.
- (17) Rangelov, D. *Mitkor2/Firefighting\_drone\_SAXION\_POLITE-Project*; 2018.
- (18) Interventiewaarden | Risico's van stoffen <https://rvs.rivm.nl/normen/rampen-en-incidenten/interventiewaarden> (accessed Oct 29, 2019).
- (19) Veenstra, R. RPAS Meet Firefighting Inhoudelijk Eindverslag.
- (20) DJI - The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography <https://www.dji.com/nl/matrice100/info> (accessed Nov 7, 2019).

- (21) Wolf, C. J.; Jerina, K. L.; Brandon, H. J.; Young, V. L. The Transport of Octamethylcyclotetrasiloxane (D4) and Polydimethylsiloxane (PDMS) in Lightly Cross-Linked Silicone Rubber. *J Biomater Sci Polym Ed* **2001**, *12* (7), 801–815. <https://doi.org/10.1163/156856201750411675>.
- (22) Emissies van schadelijke stoffen bij branden | RIVM <https://www.rivm.nl/publicaties/emissies-van-schadelijke-stoffen-bij-branden> (accessed Nov 7, 2019).