

Bijlage 10.

Meetapparatuur

Bijlage 10. Meetapparatuur

A. Temperatuur

Voor het praktijkexperiment zijn type K thermokoppels, (een nikkel – chroom & nikkel – aluminium legering (Reotemp, 2018)) met een dikte van 0,75 mm gebruikt. De redenen hiervoor zijn het brede temperatuurbereik (-270°C tot 1260°), snelle responstijd (0,06-1,8 s)¹ en de lage kostprijs. Type K thermokoppels worden ook in de literatuur veel gebruikt bij brandtesten (Guillaume, Didieux, Thiry, & Bellivier, 2014; Zevotek, Stakes, & Willi, 2018). De gebruikte thermokoppels en hun eigenschappen zijn weergegeven in tabel 1 respectievelijk tabel 2.

Tabel 1 Overzicht van de gebruikte thermokoppels

Artikelnummer	Type	Lengte	Diameter	Aantal
405-279	K RVS 1.4841	1000 mm	0,75 mm	20
405-280	K RVS 1.4841	1500 mm	0,75 mm	20
405-282	K RVS 1.4841	2000 mm	0,75 mm	25
405-283	K RVS 1.4841	3000 mm	0,75 mm	24

Tabel 2 Overzicht van de eigenschappen van de gebruikte thermokoppels

Eigenschap	Waarde
Type	K RVS 1.4841
Responstijd	0,06 – 1,8 s ⁽¹⁾
Gevoeligheid	2,2 °C of 0,75 v.d. meetwaarde (welke grootste is)
Resolutie	0,01 °C
Meetbereik	< 1100 °C
Werkbereik	< 135 °C (stekker)
Leverancier	TCDirect

Thermokoppels geven een spanningsverschil bij een temperatuursverandering en omdat de relatie tussen de spanning en de temperatuur bekend is, kan de gemeten spanning omgezet worden naar een temperatuur.

¹ <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouples-response-time>

B. Straling

Voor het praktijkexperiment zijn twee typen warmtestralingsmeters gebruikt. Op meetlocaties waar een lage stralingsbelasting ($< 5 \text{ kW/m}^2$) wordt verwacht zijn watergekoelde Schmidt-Boelter fluxmeters gebruikt en op meetlocaties waar een hoge stralingsbelasting ($5 - 15 \text{ kW/m}^2$) wordt verwacht zijn plaatfluxmeters PTHFM gebruikt.

In tabel 3 respectievelijk tabel 4 is een overzicht weergegeven van de gebruikte warmtestralingsmeters en hun eigenschappen.

Tabel 3 Overzicht van de gebruikte warmtestralingsmeters

Sensor	Type	Kalibratie waarde
19230802	PTHFM	4067 ² μV
19230803	PTHFM	4067 ² μV
19230804	PTHFM	4062 ² μV
19230805	PTHFM	4063 ² μV
19230806	PTHFM	4063 ² μV
12530	Schmidt-Boelter	0,455 \pm 0,030 $\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12420	Schmidt-Boelter	0,529 \pm 0,035 $\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12535	Schmidt-Boelter	0,411 \pm 0,027 $\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12536	Schmidt-Boelter	0,434 \pm 0,028 $\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12537	Schmidt-Boelter	0,415 \pm 0,027 $\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$

Tabel 4 Overzicht van de eigenschappen van de gebruikte warmtestralingsmeters

Eigenschap	PTHFM	Schmidt-Boelter
Responstijd	1 - 10 s	$< 0,45 \text{ s}$
Gevoeligheid	(van thermokoppel)	Zie tabel 3
Resolutie	(van thermokoppel)	Zie tabel 3
Type	PLATT-TERMOMETER K	SBG001-005-02
Bereik	(van thermokoppel)	0 – 5 kW/m^2
Werkbereik	$< 850 \text{ }^\circ\text{C}$ $< 200 \text{ }^\circ\text{C}$ (kabel)	$< 400 \text{ }^\circ\text{C}$ (kabel)

² Criterium $4096 \pm 62 \mu\text{V}$ (bij $100 \text{ }^\circ\text{C}$)

Leverancier	Pentronic	Hukseflux
-------------	-----------	-----------

Deze sensoren produceren net als thermokoppels een spanningsverschil waarbij de relatie tussen de spanning en de warmtestraling bekend is.

C. Druk

Voor het praktijkexperiment zijn mechanische drukverschilmeters gebruikt. Mechanische drukmeters bevatten een drukgevoelig element welke signaal geeft bij een drukverandering tussen twee aansluitingen. De in dit onderzoek gebruikte drukmeters zijn actieve sensoren met een siliconen piëzoresistief membraan en genereren een spanningsverschil bij vervorming van het membraan onder invloed van luchtdruk. Piëzoresistieve druksensoren worden veel gebruikt vanwege hun simpele en robuuste werking en hebben een hoge sensitiviteit. Siliconen membranen zijn geschikt voor lage drukken (< 2 kPa), maar minder geschikt voor hoge temperaturen (100 > °C)³. De drukmeters zijn daarom zoveel mogelijk op locaties geplaatst waar lage temperaturen verwacht werden. Vanaf de meetlocatie werd een luchtslang door een gat naar één van de aansluitingen van de drukmeter geleid. Het gat is (zoveel mogelijk) luchtdicht gemaakt met isolatiemateriaal.

Tabel 5 Overzicht van de gebruikte drukmeters en hun eigenschappen

Eigenschap	Waarde (laag bereik)	Waarde (hoog bereik)
Responstijd	0,125 s	0,125 s
Gevoeligheid	1,5 Pa	25 Pa
Resolutie	0,5 Pa	10 Pa
Type	HD404T1PG-AZ HD404T1PG-AZ-L	HD402T3-L
Aantal	10 resp. 1	1
Leverancier	DeltaOhm	DeltaOhm
Meetbereik	0 – 50 Pa	-2500 – 2500 Pa
Werkbereik	-10 – 60 °C 0 - 95% RH	-10 – 60 °C 0 - 95% RH

Drukmeters produceren ook een spanningsverschil waarbij de relatie tussen de spanning en de druk bekend is.

³ <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoresistive-strain-gauge/>

D. Zichtlengte / Rooklaaghoogte

Vanwege de praktische toepasbaarheid is ervoor gekozen de zichtlengte en rooklaaghoogte primair te meten met behulp van camera's. De zichtlengte is daarnaast gemeten met fotonvoltaïsche cellen. In tabel 6 is een overzicht van de zichtlengte sensoren weergegeven. De zichtlengte meters ZL1 t/m ZL4 bestonden uit een gespannen draad met getallenbordjes. Op deze zichtlengte meters was een camera gericht. De zichtlengte is vervolgens bepaald door op het camerabeeld te bepalen wanneer welk bordje nog zichtbaar was. De zichtlengte meters ZL5.1 t/m ZL6.2 bestonden uit een lichtbron met op een afstand een fotonvoltaïsche cel. De zichtlengte is vervolgens bepaald aan de hand van de lichtverzwakking ten gevolge van rook tussen de lichtbron en de fotonvoltaïsche cel. De fotonvoltaïsche zichtlengte sensoren produceren een spanningsverschil waarbij de relatie tussen de spanning en de zichtlengte berekend kan worden.

Rooklaaghoogte is gemeten door middel van de lat met hoogtemarkeringen waarop een camera gericht was. In bijlage 11 is een overzicht gegeven van de meetlocaties van zichtlengte en rooklaaghoogte.

Tabel 6 Overzicht van de zichtlengte sensoren

Zichtlengte meter	Meetlocatie	Werking	Hoogte (m)
ZL1	Gang 1.2	Camerabeeld van C5 en C6	1,50
ZL2	Gang 2.2	Camerabeeld van C15	1,50
ZL3	Gang 3.2	Camerabeeld van C20	1,50
ZL4	Gang 0.2	Camerabeeld van C24	1,50
ZL5.1	Gang 1.2, B5	Fotonvoltaïsche cel	1,50
ZL5.2	Gang 1.2, B5	Fotonvoltaïsche cel	0,30
ZL6.1	Gang 1.2, B6	Fotonvoltaïsche cel	1,50
ZL6.2	Gang 1.2, B6	Fotonvoltaïsche cel	0,30

E. Gewicht

Om een uitspraak te kunnen doen over het brandvermogen wordt het gewicht van de vuurlast gemeten gedurende de testen met behulp van loadcellen. Een loadcel is een actieve sensor en werkt analoog aan een drukkometer. Een loadcel produceert een spanning bij een bepaald gewicht. Deze relatie is op voorhand niet bekend, maar wel lineair ($< \pm 0.02$ % Full Scale). De exacte relatie tussen de gemeten spanning en het gewicht wordt daardoor bepaald door een vermenigvuldigingsfactor en een offset. Er worden drie loadcellen gebruikt in een driehoekopstelling. De som van de drie loadcellen is daarmee het totaal gewicht. Elke loadcel is gekalibreerd door van een bekend gewicht het signaal te meten en daarmee de vermenigvuldigingsfactor en offset te berekenen. Voor aanvang van elke test wordt gecontroleerd of het gemeten gewicht nog overeen komt met het bekende gewicht ($< \pm 0.5$ kg) per loadcel. Indien nodig wordt de kalibratie opnieuw uitgevoerd en worden een nieuwe

vermenigvuldigingsfactor en offset berekend. De eigenschappen van de loadcellen zijn weergegeven in tabel 7.

Tabel 7 Eigenschappen van de gebruikte loadcellen voor het meten van gewicht

Eigenschap	Waarde
Gevoeligheid	2,0020 mV/V
Resolutie	< ± 0,01 % Full Scale
Merk	Stensor
Type	STSP-7
Leverancier	Stekon
Meetbereik	0 – 100 kg
Werkbereik	-20 – 60 °C

F. Gasconcentraties

In tabel 8 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetapparatuur voor gasconcentraties. In tabel 9 en tabel 10 is een overzicht gegeven van de eigenschappen van de gebruikte meetapparatuur.

Tabel 8 Overzicht van de gebruikte meetapparatuur voor gasconcentraties

Eigenschap	Testo 350	X-am 5600	X-am 8000
Leverancier	Testo BV	Dräger AG	Dräger AG
Aantal	10	8	2
Werkbereik	-5 – 45 °C 0 – 70% RH	-20 – 50 °C 10 - 90% RH	-20 – 50 °C 10 - 90% RH
Beschermingsklasse	IP40	IP67	IP67

Tabel 9 Eigenschappen van de gebruikte Testo-meetapparatuur

Gas	Meetbereik	Resolutie	Gevoeligheid	Reactietijd
O ₂	0-25 %Vol	0,01 %Vol	± 0,2 %Vol	< 20 s
CO	0-10000 ppm	1 ppm	± 10 ppm (< 199 ppm) ± 5 % ⁴ (200 - 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 40 s

⁴ Van de meetwaarde

COlow	0-500 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % ⁴ (> 40 ppm)	< 40 s
NO	0-4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (100 - 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 30 s
NOlow	0-300 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % ⁴ (> 40 ppm)	< 30 s
NO ₂	0-500 ppm	0,1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (> 100 ppm)	< 40 s
SO ₂	0-5000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (100 – 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 30 s
CO ₂	0-50 %Vol	0,01 %Vol (< 25 %Vol) 0,1 %Vol (> 25 %Vol)	$\pm 0,3$ %Vol ± 1 % ⁴ $\pm 0,5$ %Vol $\pm 1,5$ % ⁴	< 10 s

Tabel 10 Eigenschappen van de gebruikte Dräger-meetapparatuur

Gas	Meetbereik	Resolutie	Reactietijd
CO (XXS HC)	0-10000 ppm	5 ppm	25 s
CO ₂ (XXS)	0-5 %vol	0,1 %vol	30 s
O ₂ (XXS)	0-25 %vol	0,1 %vol	10 s
CH ₄ (IR EX)	0-100 %LEL	1 % LEL	20 s
C ₄ H ₈ (isobutyleen) (PID HC) ⁵	0-2000 ppm	200 ppb – 10 ppm ⁶	onbekend

In tabel 11 is een overzicht van de meetlocaties van de Testo-meetapparatuur. De meetlocaties voor de Testo-meetapparatuur bevonden zich uitsluitend op de eerste verdieping en zijn zo gekozen dat de meetapparatuur in de badkamer van een woning geplaatst kon worden, zoals weergegeven in bijlage 11. De rookgassonde is vervolgens door een gat in de muur op de juist meetlocatie en -hoogte geplaatst. Het gat en de badkamer zijn (zoveel mogelijk) luchtdicht gemaakt met isolatiemateriaal. Sensor G1 wisselde mee met de brandruimte en komt derhalve twee keer voor op de plattegrond.

Tabel 11 Overzicht van de gebruikte gasmeters

Sensor	Type	Meetlocatie	Hoogte (m)
G1	350	BR1.19/BR1.21	1,50
G2	350	W1.20	1,50

⁵ Alleen voor X-am 8000

⁶ Afhankelijk van de meetwaarde

G3	350	W1.24	1,50
G4	350	W1.25	1,50
G5.1	350	G1.2, t.h.v. B5	1,50
G5.2	350	G1.2, t.h.v. B5	0,30
G6.1	350	G1.2, t.h.v. B6	1,50
G6.2	350	G1.2, t.h.v. B6	0,30
G7	350	G1.1	1,50
G8	350	G1.3	1,50

In tabel 12 is een overzicht weergegeven van de meetlocaties van de Dräger-meetapparatuur. De meetlocaties van de Dräger-meetapparatuur bevonden zich op alle verdiepingen met uitzondering van de eerste verdieping, zoals weergegeven in bijlage 11. De Dräger-meetapparatuur is aangezet en op de meetlocaties geplaatst. Sensoren G9 en G13 wisselen mee met de brandruimte en komen derhalve twee keer voor op de plattegronden.

Daarnaast is zijn er door de meetploegen mobiele metingen met de Dräger-apparatuur uitgevoerd. Hiervoor hebben ze naar eigen inzicht op meerdere locaties in het gebouw gedurende één minuut een meting uitgevoerd. De resultaten van elke metingen werden naar hun telefoon gestuurd en opgeslagen in een Word-bestand voor verdere verwerking. Naast de resultaten van de gasmetingen werd ook de datum, tijdstip, duur van de meting en een beschrijving van de locatie opgeslagen.

Tabel 12 Overzicht van de gebruikte Dräger-meetapparatuur

Sensor	Type	Locatie	Hoogte (m)
G9	X-am 8000	W2.19/W2.21	1,50
G10	X-am 5600	W2.24	1,50
G11	X-am 5600	G2.2, t.h.v. B12	1,50
G12	X-am 5600	G2.2, t.h.v. B13	1,50
G13	X-am 8000	W3.19/W3.21	1,50
G14	X-am 5600	W3.24	1,50
G15	X-am 5600	G3.2, t.h.v. B17	1,50
G16	X-am 5600	G3.2, t.h.v. B18	1,50
G17	X-am 5600	G0.1, t.h.v. B19	1,50
G18	X-am 5600	G0.2, t.h.v. B20	1,50

G. Camerabeeld

Om in kaart te brengen hoe rookverspreiding in de praktijk plaatsvindt wordt er ook beeldmateriaal verzameld. Op diverse locaties worden hiervoor camera's geplaatst die gedurende de testen film opnemen. Camera's kunnen actief of passief opnemen:

- > Actief: de opgenomen beelden worden direct naar een registratiecomputer gezonden (bekabeld of draadloos).
- > Passief: de camera's slaan de beelden op een opslagmedium, wat na een test uitgelezen wordt.

Het voordeel van actief opnemen is dat er live meegekeken kan worden met een test. De nadelen zijn dat er extra kabels gelegd moeten worden of dat er draadloze verbindingen opgezet moeten worden en dat de beelden op een centrale plek direct opgeslagen moeten worden. Afhankelijk van het aantal camera's en de beeldkwaliteit is daar veel verwerkingscapaciteit voor nodig.

De voordelen van passief opnemen is dat de beelden direct worden opgeslagen en dat er geen extra voorzieningen nodig zijn. De nadelen zijn dat dit pas na afloop van een test gecontroleerd kan worden en dat de opslagcapaciteit vaak beperkt is.

Er is gekozen voor twee soorten camera's voor gebruik tijdens de experimenten (zie tabel 13):

- > FireCam: deze camera's worden gebruikt in de brandruimte, G1.2 en W1.25, omdat deze (kortstondig) temperaturen tot ruim 400 °C kunnen weer staan.
- > Actioncam: deze camera's zijn stof- en waterbestendig en worden gebruikt op alle overige locaties.

Vanwege de omstandigheden tijdens een test wordt ervoor gekozen om alle camera passief te laten opnemen. Een aantal camera's wordt geconfigureerd om ook actief op te nemen, zodat er op een aantal locaties live meegekeken kan worden. Na afloop van een test worden de accu's van deze camera's vervangen door nieuwe en kunnen de gebruikte accu's opgeladen worden. De overige Actioncams worden op netstroom aangesloten. Alle camera's slaan beelden op op micro-SD-kaartjes. Omdat er twee testen per dag worden uitgevoerd is het dubbele aantal SD-kaartjes aangeschaft, zodat bij elke tweede test van de dag de beelden van de eerste test uitgelezen kunnen worden. Voor alle camera's en opslagmedia zijn tevens een aantal reserves aangeschaft.

Tabel 13 Overzicht van de gebruikte camera types

Camera's	FireCam	Actioncam
Aantal	4	25
Merk	FireCam	Nikkei
Type	4k wifi	Extreme X8S
Leverancier	SpectraCam	Coolblue
Accuduur	Niet bekend	1.5 uur
Opslagmedium	Micro-SD-kaart	Micro SD-kaart

Capaciteit	16Gb	32Gb
Beeldkwaliteit	4K/Full HD/HD	4K/Full HD/HD
Beeldhoek	150°	170°
Camera	5 megapixels	16 megapixels

H. Meetsystemen

Het meten, aflezen en opslaan van de diverse signalen van de sensoren kan op diverse manieren. Vanwege de hoeveelheid en diversiteit van de sensoren is ervoor gekozen drie meetsystemen parallel te gebruiken:

- > Testo-meetsysteem, voor het registreren van gasconcentraties door Testo-apparaten. Maakt gebruik van de meegeleverde software.
- > Dräger-meetsysteem, voor het registreren van gasconcentraties door Dräger-apparaten. Maakt gebruik van de meegeleverde software.
- > Meetsysteem voor de temperatuur, druk, straling, zichtlengte en weegschaal.

Het Testo-meetsysteem maakt gebruik van Testo-hardware en -software (zie figuur 1), gekoppeld aan een registratiecomputer. De Testo-hardware bestaat uit een gasanalyseapparaat en een rookgassonde, welke gasmonsters neemt. De gasanalyseapparaten communiceren middels een CAN-bus signaal en kunnen elkaars signaal doorgeven (daisy-chaining). Vanwege praktische beperkingen zijn er twee signaalketens opgezet, ieder met vijf gasanalyseapparaten.



Figuur 1 Links: Testo 350 gasanalyseapparaat. Rechts: Testo rookgassonde.⁷

Het Dräger-meetsysteem maakt gebruik van Dräger-hardware en -software (zie figuur 2). De hardware bestaat uit twee typen mobiele meters (X-am 5600 en X-am 8000) en een oplaad- en kalibratiestation. Na afloop van elk experiment zijn alle meters uitgelezen, gekalibreerd en opgeladen.

⁷ <https://www.testo.com/nl-NL/testo-350/p/0632-3510>

<https://www.testo.com/nl-NL/modulaire-rookgassonde-insteekdiepte-335-mm-incl-conus-t/p/0600-8764>



Figuur 2 Links: Dräger X-am 5600 mobiele meter. Midden: Dräger X-am 8000 mobiele meter. Rechts: Dräger X-dock oplaad- en kalibratiestation. ⁸

Er is door de Brandweeracademie eerder gebruik gemaakt van een DAQ (data acquisition)-systeem voor het meten van temperatuur en straling. Een DAQ-systeem kan signalen opslaan voor latere analyse (offline) of doorsturen naar een computer met registratiesoftware voor live monitoren (online). Het gebruik hiervan vereist verregaande kennis over het systeem, maar geeft veel flexibiliteit (een DAQ-systeem kan geheel naar wens opgebouwd en uitgebreid worden). Met het oog op eerdere ervaringen en de flexibiliteit van een DAQ-systeem voor toekomstige experimenten is daarom gekozen de overige sensoren voor temperatuur, straling, druk, gewicht en zichtlengte aan te sluiten op het Compact DAQ systeem in combinatie met LabVIEW Software van National Instruments. Het DAQ-systeem van NI is opgebouwd uit modules in een chassis (zie figuur 3), welke gekoppeld wordt aan een computer met registratie software.



Figuur 3 Links: Een aantal DAQ-modules.⁹ Rechts: Een DAQ-chassis met vier slots voor modules.

De modules filteren, versterken en bundelen de signalen van de sensoren en het chassis kan deze doorsturen middels een USB of Ethernet signaal. Er is gekozen voor een chassis welke de signalen door kan sturen middels een Ethernet signaal, zodat de metingen online gevolgd kunnen worden. Ethernet biedt langere signaaloverdracht afstanden dan USB. Vanwege de grootte en de complexiteit van het gebouw is ervoor gekozen diverse modules (zie tabel 14) aan te schaffen verdeeld over meerdere chassis (zie tabel 15).

⁸ <https://www.draeger.com/Products/Content/x-am-5600-pi-9045129-nl-nl.pdf>

https://www.draeger.com/en_uk/Products/X-am-8000

<https://www.kleinschmidtgmbh.com/Draeger-X-dock-Modul-X-am-125-1/en>

⁹ http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/03211720_1.jpg&title=cDAQ-9185&oracleLang=i
<https://www.ni.com/nl-nl/shop/select/c-series-voltage-input-module>

Tabel 14 Overzicht van de gebruikte modules en hun eigenschappen

Module	NI 9202	NI 9212	NI 9213
Kanalen	16	8	16
Signaaltype	Volt	Temperatuur	Temperatuur
ADC	24 bit	24 bit	24 bit
Resolutie	0,6 μ V	0,01 °C	0,02 °C
Werkbereik	-40 – 70 °C 10 - 90% RH	-40 – 70 °C 10 - 90% RH	-40 – 70 °C 10 - 90% RH

Tabel 15 Overzicht van de gebruikte chassis en hun eigenschappen

Chassis	NI 9188	NI 9185
Slots	8	4
Ethernet	10/100/1000 Mbps (auto)	10/100/1000 Mbps (auto)
Maximale signaalkabellengte	100 m	100 m
Resolutie	32 bits	32 bits
Werkbereik	-40 – 70 °C 10 - 90% RH	-20 – 55 °C 10 - 90% RH

De gebruikte chassis kunnen elkaars signaal doorgeven in een keten (daisy-chaining). Dit heeft als voordeel dat er minder bekabeling nodig is, maar heeft als nadeel dat als een kabel of chassis in de keten uitvalt, alle daaropvolgende signalen ook wegvallen. Er is daarom gekozen om ieder chassis te verbinden met een Ethernet switch en vervolgens met de registratiecomputer (ster topologie). Voor het testen, synchroniseren en registreren van alle sensoren van het DAQ-systeem zijn eigen scripts ontwikkeld.

Om alle signaalkabels, voedingskabels en luchtslangen van de diverse systemen te beschermen tegen beschadigingen worden deze zoveel mogelijk over de grond gelegd (waar de laagste temperaturen verwacht worden) en onder een kabelgoot geplaatst. Waar een kabelgoot niet mogelijk is, worden de draden ingepakt met aluminiumfolie of -tape. Evengoed zijn er reguliere inspecties van de verbindingen gehouden en zijn beschadigde kabels vervangen.

I. Meetconfiguraties

Voor het bevestigen van verschillende sensoren bij brandexperimenten wordt in de literatuur veelal gebruik gemaakt van een 'thermocouple tree' ofwel thermokoppelboom. Er wordt daarom een 'meetboom' ontworpen waar thermokoppels en overige sensoren aan bevestigd kunnen worden op verschillende hoogtes. Omdat bij de grond de laagste temperaturen

verwacht worden (zie bijlage 6) is bij de basis van de boom een afgesloten en geïsoleerde ruimte ontworpen voor het DAQ-chassis. Het DAQ-chassis is hiermee zoveel mogelijk beschermd tegen de invloeden van temperatuur, straling, rook, water en/of stoom. Deze meetbomen worden vervolgens op de meetlocaties B1 t/m B20 geplaatst. Per meetlocatie is in tabel 16 een overzicht gegeven van de sensoren die aan elke meetboom bevestigd zijn. Naast de meetlocaties is de temperatuur ook gemeten in de ventilatiekanalen op de gang, zoals weergegeven in bijlage 11. Tevens is de locatie van de weegschaal aangegeven. Deze wisselt mee met de brandruimte en is derhalve twee keer weergegeven.

Tabel 16 Overzicht van de meetbomen en de gemeten parameters

Meetboom	Locatie	Parameter	Hoogte (m)
B1	BR1.19/BR1.21	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30 – 1,50
		Druk	0,20
B2	W1.20	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Druk	0,20
B3	W1.24	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Druk	0,20
B4	W1.25	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30 – 1,50
		Druk	0,20
B5	G1.2, t.h.v. W1.23	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30 – 1,50
		Druk	0,20
		Zichtlengte	0,30 – 1,50
B6	G1.2, t.h.v. W1.28	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30 – 1,50
		Druk	0,20
		Zichtlengte	0,30 – 1,50
B7	G1.1	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30
		Druk	0,20

B8	G1.3	Temperatuur	0,30 – 0,90 – 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,20 – 2,40
		Straling	0,30
		Druk	0,20
B9	W2.19	Temperatuur	0,30 – 1,50
		Druk ¹⁰	0,20
B10	W2.21	Temperatuur	0,30 – 1,50
		Druk ¹¹	0,20
B11	W2.24	Temperatuur	0,30 – 1,50
B12	G2.2, t.h.v. W2.23	Temperatuur	0,30 – 1,50
		Druk	0,20
B13	G2.2, t.h.v. W2.28	Temperatuur	0,30 – 1,50
B14	W3.21	Temperatuur	0,30 – 1,50
		Druk ¹¹	0,20
B15	W3.19	Temperatuur	0,30 – 1,50
		Druk ¹⁰	0,20
B16	W3.24	Temperatuur	0,30 – 1,50
B17	G3.2, t.h.v. W3.23	Temperatuur	0,30 – 1,50
B18	G3.2, t.h.v. W3.28	Temperatuur	0,30 – 1,50
B19	G0.1	Temperatuur	0,30 – 1,50
B20	G0.2	Temperatuur	0,30 – 1,50

J. Mogelijke meetfouten

Zoals beschreven in de onderzoekopstelling heeft elke sensor een gevoeligheid en resolutie. De gevoeligheid van een sensor geeft de mate van betrouwbaarheid van een meting weer. Als bijvoorbeeld een thermokoppel met een gevoeligheid van 1,6 °C wordt blootgesteld aan een temperatuur van 100 °C kan het thermokoppel een temperatuur aangeven tussen de 98,4 en 101,6 °C. De resolutie van een sensor geeft de kleinste verandering weer die een sensor kan meten. Een thermokoppel met een resolutie van 0,1 °C zal bijvoorbeeld een temperatuursverandering van 0,02 °C niet kunnen registreren.

¹⁰ Wanneer de brandruimte BR1.19 is

¹¹ Wanneer de brandruimte BR1.21 is

Daarnaast heeft elke sensor een responstijd, de tijd die de sensor nodig heeft om een verandering in signaal te registreren. Deze is sterk afhankelijk van het type sensor en kent verschillende definities.

Voor alle sensoren geldt dat de gevoeligheid, resolutie en responstijd klein genoeg moeten zijn om de gewenste processen te meten. Omdat er in dit experiment met name scenario's met elkaar zijn vergeleken zijn de gevoeligheid en resolutie van minder belang. De processen die in dit experiment zijn onderzocht vinden plaats op erg wisselende tijdschalen. De resultaten zijn daarom teruggebracht tot tijdsvakken van minuten. De responstijden van de sensoren kunnen oplopen tot maximaal 1 minuut. Dit betekent, met name voor resultaten gebaseerd op gasconcentraties, dat de gerapporteerde tijden overschat kunnen zijn en dus gezien moeten worden als een maximum.

De gebruikte thermokoppels hebben een gevoeligheid van 2,2 °C of 0,75% van de meetwaarde (welke grootste is) en een resolutie van 0,1 °C. De hoogste gemeten temperaturen bedroegen rond de 400 °C. De meetfout bij deze temperaturen bedroeg dus ongeveer 3 °C. De thermokoppels hebben temperaturen gemeten in het bereik van 20 °C tot 400 °C. In dit bereik is een resolutie van 0,1 °C ruim voldoende. De responstijd van de gebruikte thermokoppels is maximaal 1,8 s. Omdat in de analyse wordt gerekend met tijdvakken in minuten is de vertraging in het gemeten signaal van de thermokoppels verwaarloosbaar klein.

De plaatfluxmeters hebben dezelfde eigenschappen als van de gebruikte thermokoppels, omdat deze stralingsmeters gebruik maken van eenzelfde type K thermokoppel. Dit effect werkt door via de gebruikte formule voor straling en leidt tot een gevoeligheid en resolutie van $< 1 \text{ W/m}^2$. De straling is met de plaatfluxmeters gemeten in een bereik van 0,45 tot 10 kW/m^2 . De meetfout is hierbij dus verwaarloosbaar klein. De responstijd van plaatfluxmeters is echter langer dan van de thermokoppels, vanwege de warmtecapaciteit van de plaat. Dit heeft geen noemenswaardige invloed op de resultaten omdat straling op eenzelfde wijze wordt ervaren door een persoon.

De Schmidt-Boelter fluxmeters hebben ieder hun eigen gevoeligheid en resolutie. Deze hebben een maximale gevoeligheid van ongeveer 1 W/m^2 . De resolutie wordt bij deze meters hoofdzakelijk bepaald door het meetsysteem en bedroeg ongeveer 1 W/m^2 . De straling is met de Schmidt-Boelter fluxmeter gemeten in een bereik van 0 tot $> 1000 \text{ W/m}^2$. De meetfout is ook hierbij dus verwaarloosbaar. De responstijd van de Schmidt-Boelter fluxmeter is $< 1 \text{ s}$ en dus ook verwaarloosbaar klein.

Voor de zichtlengte en rooklaaghoogte meter op basis van camerabeeld is geen meetfout te definiëren omdat deze kwalitatief door twee onderzoekers onafhankelijk van elkaar zijn beoordeeld. Hierbij is voor rooklaaghoogte de tweedeling gemaakt tussen boven en onder de 1,50 m en voor zichtlengte de tweedeling tussen 5 m wel of niet zichtbaar. De fotonuclaire zichtlengtemeters waren proof-of-concept in eigen beheer ontwikkelde sensoren. Omdat de werking van de fotonuclaire cel sterk afhangt van omgevingslicht is de gevoeligheid en resolutie onbekend. Voor de berekening van de zichtlengte wordt gebruik gemaakt van een verhouding en daardoor is het effect hiervan echter minimaal. Als maximale intensiteit is steeds de gemiddelde lichtinval gedurende de eerste minuut van de elke test genomen, waardoor zoveel mogelijk gecompenseerd wordt voor verschillen in omgevingslicht.

De Testo-meetapparatuur en Dräger-meetapparatuur hebben voor verschillende gassen verschillende gevoeligheden en resoluties. De grenswaarden van deze gassen voor het berekenen van de overlevingsmogelijkheden zijn dusdanig hoog dat resolutie en gevoeligheid een verwaarloosbare invloed hebben op de meetresultaten. Zowel de Testo- als de Dräger-apparatuur hebben voor verschillende gassen verschillende responstijden. Deze kunnen oplopen tot maximaal 40 s. Dit betekent dat er een vertraging zit in de gemeten gasconcentraties.

K. Dataverwerking en datatransformatie

LabView

De ruwe data is eerst geüniformeerd, dat wil zeggen dat alleen de kanalen waar sensoren op zijn aangesloten meegenomen worden in de verdere analyse. Tevens wordt er gecontroleerd of alle sensoren op de juiste kanalen zijn aangesloten geweest en of de kanalen de juiste benaming hebben. Vervolgens is de data ingelezen met behulp van eigen ontwikkelde scripts in Python 3.7.0. Op de voltagedata is een slepend gemiddelde toegepast. Dit introduceert een vertraging in de data, dus wordt de data ‘teruggeschoven’ met de breedte van het gemiddelde. De gebruikte gemiddeldes zijn weergegeven in tabel 17.

Tabel 17 Gebruikte slepende gemiddelden

Sensor	Slepend gemiddelde (in meetpunten)
Druk	51
Zichtlengte	51
Gewicht	101
Straling (Schmidt-Boelter)	101

Vervolgens zijn de databestanden gecombineerd en geconverteerd naar de juiste eenheden. De temperatuurdata is al in de juiste eenheid gemeten, maar de temperatuur en voltages zijn omgerekend naar straling (kW/m²), gewicht (kg), zichtlengte (m) en druk (Pa). Hierover is gebruikt gemaakt van de kalibraties en referentiebestanden van de specifieke sensoren. Een overzicht hiervan is hieronder per grootte weergegeven.

Straling

De berekening van de straling ϕ in W/m² op een bepaald tijdstip is voor de plaatfluxmeters weergegeven in vergelijking 1 (Wickström, Anderson, & Sjöström, 2019).

$$\phi = (5.67037 \cdot 10^{-8} \cdot T_{pt}^4) - \left(76 \cdot (0.5(T_{pt} + T_{air}))\right)^{-0.66} \cdot \frac{|T_{pt} - T_{air}|^{1/3}}{\varepsilon} \cdot (T_{air} - T_{pt})$$

Vergelijking 1 Omrekening plaattemperatuur naar straling

Hierin zijn T_{pt} en T_{air} de temperatuur van de plaat respectievelijk de omgeving in Kelvin. ε is de emissiecoëfficiënt volgens de volgende formule (zie vergelijking 2).

$$\varepsilon = \min(1.03 - 0.436 \cdot 10^{-3} \cdot T_{pt}, 1)$$

Vergelijking 2 Formule emissiecoëfficiënt

Voor T_{air} wordt de temperatuur van het thermokoppel op gelijke hoogte met de plaatfluxmeter genomen. Deze zijn weergegeven in tabel 18.

Tabel 18 Referentiethermokoppels per plaatfluxmeter

Plaatfluxmeter	Referentiethermokoppel
B1 - 1,50 m (SP1.1.1)	B1 - 1,50 m (TK1.1.4)
B1 - 0,30 m (SP1.1.2)	B1 - 0,30 m (TK1.1.6)
B4 - 1,50 m (SP1.4.1)	B4 - 1,50 m (TK1.4.4)
B5 - 1,50 m (SP1.5.1)	B5 - 1,50 m (TK1.5.4)
B5 - 1,50 m (SP1.6.1)	B6 - 1,50 m (TK1.6.4)

De berekening van de straling ϕ in W/m^2 op een bepaald tijdstip is voor de Schmidt-Boelter stralingsmeters weergegeven in vergelijking 3.

$$\phi = \frac{U}{S}$$

Vergelijking 3 Omrekening watergekoelde stralingsmeters

Hierin is U het gemeten voltage in Volt en S is de gevoeligheid van de meter. Deze zijn weergegeven in tabel 19.

Tabel 19 Gevoeligheid per stralingsfluxmeter

Stralingsmeter	Gevoeligheid S ($V/W/m^2$)
B4 – 0,30 m (SB1.4.2)	$4,55 \cdot 10^{-6}$
B5 – 0,30 m (SB1.5.2)	$5,29 \cdot 10^{-6}$
B6 – 0,30 m (SB1.6.2)	$4,11 \cdot 10^{-6}$
B7 – 0,30 m (SB1.7.1)	$4,34 \cdot 10^{-6}$
B8 – 0,30 m (SB1.8.1)	$4,15 \cdot 10^{-6}$

Gewicht

Het gewicht G in kg per loadcel wordt als volgt berekend (vergelijking 4).

$$G = a \cdot U + b$$

Vergelijking 4 Omrekening gewicht

Waarbij U het gemeten voltage in Volt is en a en b kalibratiewaarden. Elke loadcel heeft een aparte kalibratie met een eigen multiplier (a) en offset (b). Voor de start van elk experiment zijn alle loadcellen afzonderlijk gecontroleerd met een aantal testgewichten. Als het gemeten gewicht afweek van het testgewicht werd de loadcel opnieuw gekalibreerd. De kalibratiewaarden zijn per experiment weergegeven in tabel 20.

Tabel 20 Gebruikte kalibraties voor de weegschaal loadcellen

Testnummer	Loadcel 1		Loadcel 2		Loadcel 3	
	a	b	a	b	a	b
1	4273,622	1,269	4263,122	1,132	4259,934	4,357
2	4273,622	1,269	4263,122	1,132	4259,934	4,357
3	4262,424	1,214	4252,406	1,212	4510,446	4,068
4	4262,424	1,214	4252,406	1,212	4510,446	4,068
5	4262,424	1,214	4252,406	1,212	4510,446	4,068
6	4262,424	1,214	4252,406	1,212	4312,872	4,504
7	4580,303	0,943	4605,269	0,999	4688,363	3,428
8	4257,920	0,315	4248,176	-0,244	4252,116	5,179
9	4687,132	5,758	4714,340	-6,550	4729,102	-0,208
10	4280,688	0,542	4260,379	-0,117	4256,694	4,811
11	4280,688	0,542	4260,379	-0,117	4256,694	4,811
12	4280,688	0,542	4260,379	-0,117	4256,694	4,811
13	4280,688	0,542	4260,379	-0,117	4256,694	4,811
14	4280,688	0,542	4208,728	0,338	4256,694	4,811
15	4280,688	0,542	4281,672	-0,138	4317,849	4,604
16	4289,311	0,784	4281,672	-0,138	4317,849	4,604
17	4289,311	0,784	4281,672	-0,138	4317,849	4,604
18	4289,311	0,784	4281,672	-0,138	4317,849	4,604
19	4289,311	0,784	4281,672	-0,138	4317,849	4,604

Druk

De druk P gemeten door de drukmeters is als volgt in Pascal berekend (vergelijking 5).

$$P = a \cdot U + b$$

Vergelijking 5 Omrekening drukmeters

Met U het gemeten voltage in Volt en a en b respectievelijk de multiplier en offset. Voor de hoge drukmeter geldt $a = 50$ en $b = -250$ en voor de overige drukmeters geldt $a = 5$ en $b = 0$.

Zichtlengte

De zichtlengtes zijn berekend uit de gemeten waarden van zichtlengtemeters volgens vergelijking 6 (van Herpen, 2007).

$$Z = \frac{-Z_f L}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}$$

Vergelijking 6 Omrekening zichtlengte

Hierin is Z de zichtlengte in meters, Z_f de zichtlengte factor, L de afgelegde lichtweg in meters, I de gemeten intensiteit van monochromatisch licht en I_0 de referentie intensiteit van monochromatisch licht. Hierbij wordt het licht uitgezonden en ontvangen door de zichtlengtemeter als monochromatisch beschouwd. De zichtlengte factor Z_f is een compensatiefactor voor verschillende situaties. Voor lichtgevende en reflecterende objecten in rook is deze factor 8. Voor niet-lichtgevende objecten in zwarte rook is deze factor 3 en voor witte of grijze rook is deze 2,3. In de analyse is een constante compensatiefactor van 3 gebruikt. De afgelegde lichtweg L is twee keer gemeten en wordt verder als constant aangenomen. De gemeten afgelegde lichtweg per sensor is weergegeven in tabel 21.

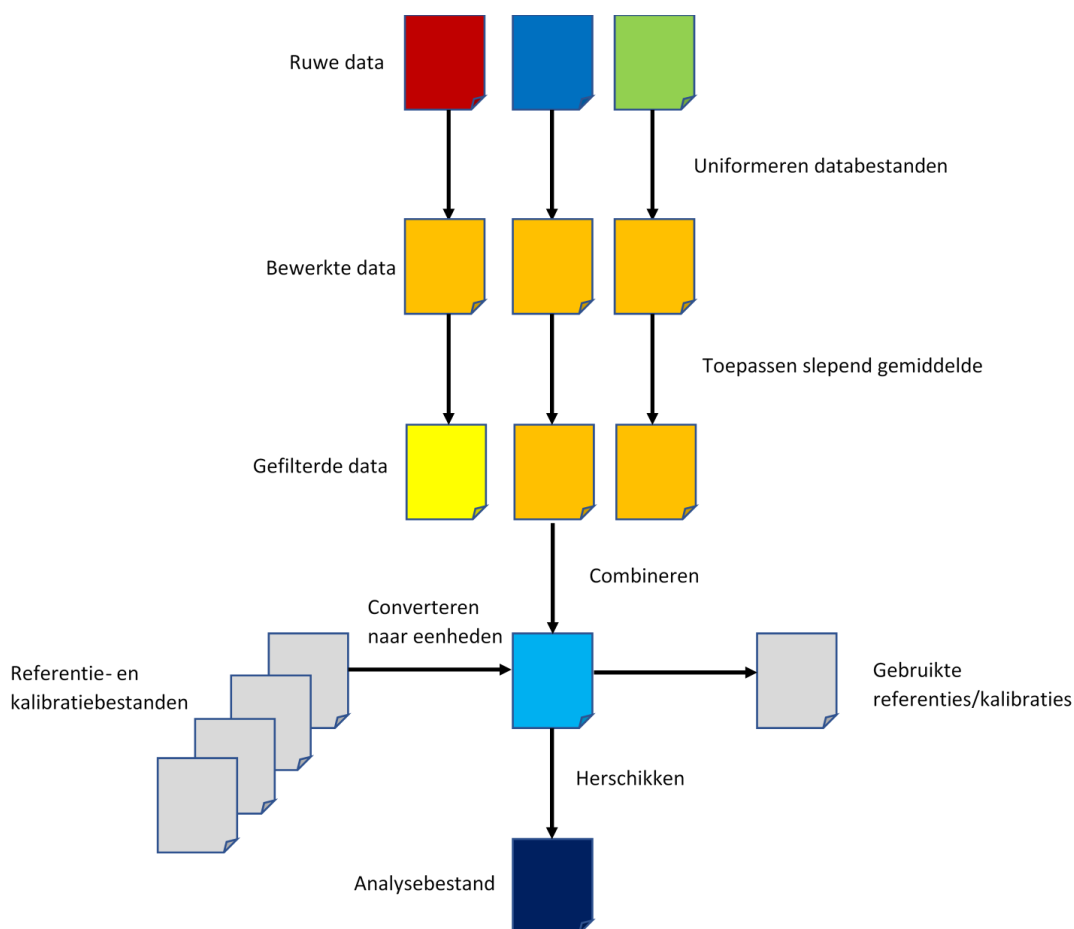
Tabel 21 Gemeten afgelegde lichtweg per zichtlengtemeter

Sensor	Afgelegde lichtweg [cm] 24-06 t/m 01-07	Afgelegde lichtweg [cm] 02-07 t/m 05-07
B5 – 1,50 m (ZL1,5,1)	21,6	24,6
B5 – 0,30 m (ZL1,5,2)	17,8	20,5
B6 – 1,50 m (ZL1,6,1)	17,9	17,8
B6 – 0,30 m (ZL1,6,2)	18,1	18,3

De intensiteit het inkomende licht I wordt aangenomen als proportioneel met de gemeten spanning V . De referentie intensiteit I_0 wordt berekend als het gemiddelde van de eerste 500 meetwaarden. De maximale zichtlengte wordt gesteld op 100 m (100%).

Verwerkingsproces LabVIEW

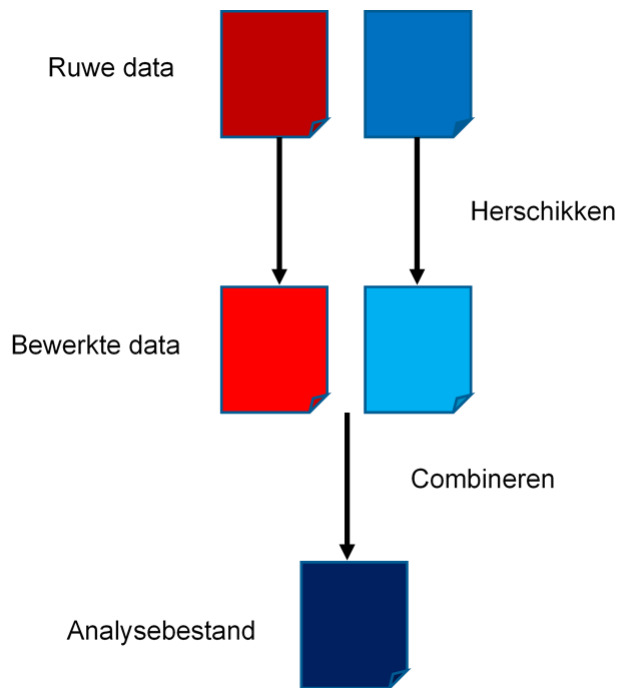
Als laatste is alle data herschikt naar een meetfrequentie van 1 Hz (1 meting per seconde) tot een compleet bestand per experiment. Dit bestand is gebruikt voor de verdere analyse. Het verwerkingsproces voor de LabVIEW-data is schematisch weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 Schematische weergave van de verwerking van LabVIEW-data

Verwerkingsproces testo-data

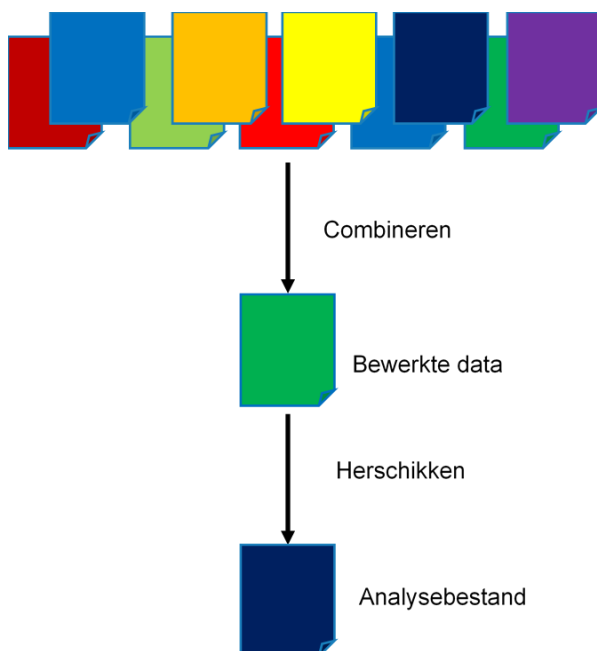
In de gebruikte configuratie heeft de Testo-meetapparatuur een meetfrequentie van 1/3 Hz (1 meting per 3 seconden) (Testo SE & Co. KGaA, 2005). Hierdoor kan een verschil ontstaan in de metingen van de twee configuraties van max 1 s. De ruwe data is daarom ingelezen met een eigen ontwikkelde script in Python 3.7.0 en eerst herschikt naar het dichtstbijzijnde 1/3 Hz tijdstip na start test. Zo kunnen de beide configuraties gecombineerd en vergeleken worden. Dit gecombineerde bestand is gebruikt voor de verdere analyse. Het verwerkingsproces voor de Testo-data is schematisch weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Schematische weergave van de verwerking van Testo-data

Verwerkingsproces dräger-data

De metingen van de Dräger-apparatuur zijn opgeslagen in een bestand per sensor. Hieruit zijn met behulp van eigen ontwikkelde scripts in Python 3.7.0 de meetwaarden ingelezen. De Dräger-apparatuur registreert alleen als een meetwaarde veranderd, dus de data heeft geen constante meetfrequentie. Deze is daarom herschikt naar een meetfrequentie van 1 Hz en vervolgens gecombineerd tot één bestand. Dit bestand is gebruikt voor de verdere analyse. Het verwerkingsproces voor de Dräger-data is schematisch weergegeven in figuur 6.



Figuur 6 Schematische weergave van de verwerking van Dräger-data

De mobiele metingen met de Dräger-apparatuur zijn puntmetingen en geven één meetwaarde per locatie. De metingen zijn voor elke sensor in een apart bestand opgeslagen, welke meerdere puntmetingen kon bevatten. De meetwaarden van alle puntmetingen zijn ingelezen en verzameld in een Excel-bestand voor overzicht.

Overzichten

Naast een analysebestand per test per datastroom is er met eigen ontwikkelde scripts in Python 3.7.0 ook een Excel-bestand gegenereerd met een overzicht van het gemiddelde, de standaarddeviatie, het minimum, het maximum, de mediaan en het bereik per sensor. Deze overzichten zijn gemaakt voor de vluchtfase en inzetfase afzonderlijk.

Literatuurlijst

- Guillaume, E., Didieux, F., Thiry, A., & Bellivier, A. (2014). Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment. *Fire Safety Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.014>
- Reotemp. (2018). Type K Thermocouple.
- Testo SE & Co. KGaA. (2005). Testo 350 Gebruiksaanwijzing.
- van Herpen, R. (2007). Rookdichtheid en zichtlengte. *Kennisbank Bouwfysica*, (1), 1–10.
- Wickström, U., Anderson, J., & Sjöström, J. (2019). Measuring incident heat flux and adiabatic surface temperature with plate thermometers in ambient and high temperatures. *Fire and Materials*, 43(1), 51–56. <https://doi.org/10.1002/fam.2667>
- Zevotek, R., Stakes, K., & Willi, J. (2018). *Impact of Fire Attack Utilizing Interior and Exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Full Scale Experiments*. Columbia.