

## Mätning av strålningsabsorption i sprayen från skärsläckaren Cobra



Anton Johansson

**Brandingenjör  
2018**

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser

# Förord

Detta examensarbete utgör det sista momentet av Brandingenjörsutbildningen vid Luleå tekniska universitet. Denna rapport avslutar utbildningen varpå en examen som Brandingenjör kan tas ut.

Jag vill tacka min handledare Johan Biörsmark på ColdCut Systems för hans entusiasm i projektet och viktiga bidrag till att detta examensarbete kunde möjliggöras.

Jag vill vidare tacka min examinator Michael Försth på RISE och Luleå tekniska universitet, samt min handledare Raúl Ochoterena på RISE för all hjälp före, under och efter försöksdagen. Tack vare deras expertis och hjälpsamhet i området kunde försöken planeras väl.

Jag vill även rikta ett tack till Ulf Wickström på Luleå tekniska universitet som har bidragit med viktiga verktyg för att tolka resultaten samt hans bidrag på försöksdagen.

Till sist vill jag även tacka min handledare Alexandra Byström på Luleå tekniska universitet för hjälp med att skapa struktur i arbetet.

*Anton Johansson*

**Anton Johansson, Göteborg**

2018-05-23

## Sammanfattning

En skärsläckare är ett högtryckssystem som idag används av räddningstjänsten för att kunna bekämpa bränder och skapa bättre miljöer i brandutrymmen, utan att själv befinna sig i själva utrymmet. Tack vara högt tryck och en abrasiv har redskapet en skärande förmåga. Att den pressar ut vatten vid ett väldigt högt tryck genom ett litet munstycke bidrar även till att den producerar en fin vattendimma.

Tidigare forskning visar på att vattendimor har en dämpande förmåga av värmestrålning och kan vara lämpliga som strålningsköldar för infallande värmestrålning.

I detta examensarbete har skärsläckaren coldcut™ cobra, tillverkad av ColdCut Systems, använts för att undersöka hur bra dämpande egenskaper mot värmestrålning vattendimman har som produceras när coldcut™ cobra används.

Resultatet visar att vattendimman som produceras har en betydande effekt på den infallande strålningen mot ett objekt som befinner sig på andra sidan vattendimman. Effekten varierar beroende på hur stor del av flammorna från brandkällan som vattendimman täcker.

## **Abstract**

A cutting extinguisher is a high-pressure system that is used by fire brigades to fight fires and improve the conditions in a fire compartment, without having to enter the fire compartment. Due to the high pressure and because the water runs through a very small nozzle, the tool has a cutting ability when used with abrasive, and creates a very fine water mist.

Earlier scientific work shows that water mists has an absorbing ability of incident heat radiation and therefore could be adaptable as a radiation shield for incident heat radiation.

In this thesis the cutting extinguisher coldcut™ cobra, manufactured by ColdCut Systems, has been examined to determine the radiation reducing ability off the water mist.

The result shows that the water mist that are being produced has a considerable effect on the incident radiation that an object behind the water mist experience. The effect varies depending on how much the water mist covers the flame from the fire source.

## Innehållsförteckning

<b>1. Inledning .....</b>	<b>1</b>
1.1. Bakgrund.....	1
1.1.1. Strålningsabsorption i vattendimma .....	2
1.1.2. Droppstorlek från skärsläckare Coldcut™ Cobra.....	3
1.1.3. Tidigare försök gällande strålningsabsorption i vattendimma.....	4
1.2. Syfte .....	7
1.3. Avgränsningar.....	7
<b>2. Teori.....</b>	<b>8</b>
2.1. Skärsläckaren Coldcut™ Cobra.....	8
2.2. Adiabatisk yttemperatur.....	10
2.3. Vinkelfaktor .....	11
2.4. Flamhöjd .....	13
2.5. Elektromagnetiskt spektrum .....	13
2.6. Mätutrustning.....	14
2.6.1. Standard plattermoelement .....	14
2.6.2. Plattermoelement värmeflödesmätare (PTHFM).....	15
2.6.3. Värmeflödesmätare.....	16
2.6.4. FTIR Spektrometer .....	18
<b>3. Metod.....</b>	<b>19</b>
3.1. Litteraturstudier.....	19
3.2. Försöksuppställning .....	19
3.2.1. Försök 1 .....	24
3.2.2. Försök 2 .....	25
3.2.3. Försök 3 .....	26
3.2.4. Försök 4 .....	27
3.2.5. Försök 5 .....	28
3.3. Dataanalys.....	29
<b>4. Resultat.....</b>	<b>30</b>
4.1. Försök 1 .....	31
4.2. Försök 2 .....	32
4.3. Försök 3 .....	33
4.4. Försök 4 .....	35
4.5. Försök 5 .....	37
4.6. Uppskattning av flamhöjd kontra täckt yta av spray.....	39
<b>5. Diskussion .....</b>	<b>40</b>
<b>6. Slutsats.....</b>	<b>44</b>
6.1. Förslag på framtida studier .....	44
<b>7. Referenser .....</b>	<b>45</b>
<b>8. Bilagor .....</b>	<b>A</b>
8.1. Bilaga A: Beräkning av konvektiva värmeövergångskoefficienten.....	A
8.2. Bilaga B: Temperaturmätningar med plattermoelement.....	C
8.3. Bilaga C: Uppmätt effekt hos gasolbrännaren .....	I

## Teckenförklaring

$T_r$	Strålningstemperatur	[K]
$T_g$	Gastemperatur	[K]
$T_s$	Yttemperatur	[K]
$T_{AST}$	Adiabatisk yttemperatur	[K]
$T_i$	Begynnelsestemperatur	[K]
$\dot{q}''_{inc}$	Infallande strålning	[kW/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}''_{rad}$	Nettobidrag från infallande strålning	[kW/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}''_{con}$	Värmeflöde via konvektion	[kW/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Stefan Boltzmanns konstant	[5,67·10 <sup>-8</sup> Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
$\varepsilon$	Emissivitet	[-]
$h_c$	Konvektiv värmeövergångskoefficient	[W/m <sup>2</sup> K]
Gr	Grashof tal	[-]
Nu	Nusselt tal	[-]
Pr	Prandtl tal	[-]
k	Konduktivitet	[W/(m·K)]
g	Gravitationskonstanten	[9,81 m/s <sup>2</sup> ]
L	Karaktäristik längd	[m <sup>-1</sup> ]
A	Area	[m <sup>2</sup> ]
P	Omkrets	[m]
k	Konduktivitet	[W/m <sup>2</sup> K]
$\rho$	Densitet	[kg/m <sup>3</sup> ]
c	Specifik värmekapacitet	[J/kg·K]
$\lambda$	Våglängd	[ $\mu$ m]
t	Tid	[s]
L	Längd	[m]
$\dot{Q}$	Effekt	[MW]

# 1. Inledning

I detta avsnitt presenteras en inledande förklaring till problematiken samt vad som gjorts tidigare inom samma område.

## 1.1. Bakgrund

En skärsläckare är ett släcksystem som har förmågan att skära igenom material tack vare att vattnet tillsammans med ett abrasiv trycks genom ett väldigt litet munstycke med höga tryck. I och med det höga trycket som används bildas även en fin vattendimma. [1] Det finns olika varumärken som utnyttjar denna teknik, i Sverige är ColdCut Systems den största tillverkaren men liknande produkter finns i t.ex. USA där ett företag som heter Pyrolance tillverkar en liknande produkt [2].

Att en vattendimma absorberar samt sprider en viss del av värmestrålningen som en brand avger är ett väldokumenterat faktum [3]. Det har tidigare gjorts studier som visar på att skärsläckaren coldcut<sup>TM</sup> cobra har en bra förmåga att producera en dimma bestående av väldigt små droppar i jämförelse med andra alternativa system så som sprinklersystem eller dimmspik [4]. Forskning har även visat att en dimma med mindre droppar har en högre förmåga att absorbera värmestrålningen [5].

Trots dessa förutsättningar har aldrig en utredning gjorts på just Cobrans förmåga att absorbera värmestrålning.

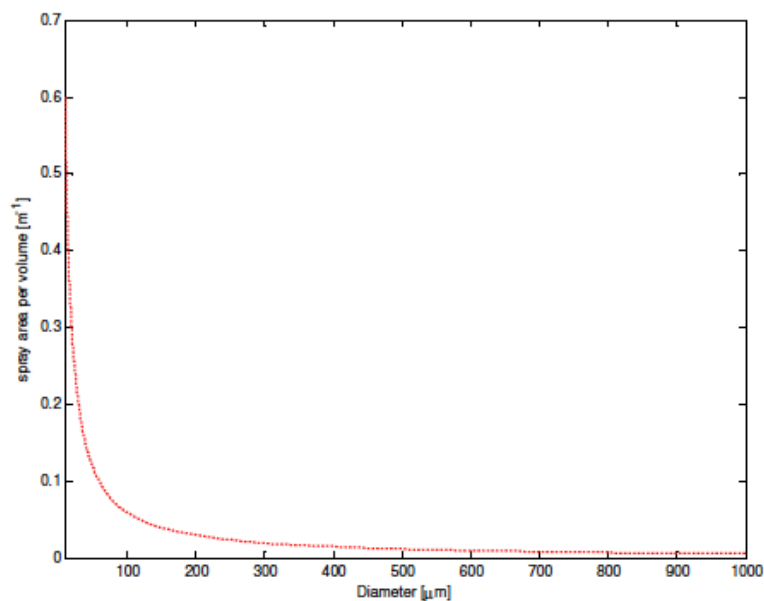
Indicier från räddningspersonal talar om att de kan märka en viss effekt av den absorberande förmågan. I en liten kommun inträffade en brand där risken för brandspridning var stor mellan det brandhärjade huset och ett närliggande hus. Resurserna som kom först på plats var väldigt begränsade och bedömningen gjordes att vattnet skulle ta slut innan förstärkning skulle anlända om man skulle försöka förhindra brandspridning på ett konventionellt sätt.

Räddningsledaren tog då beslutet att använda Cobran, som har en betydligt lägre vattenförbrukning än konventionell släckmetod, som en strålningssköld mellan de båda byggnaderna. På detta sätt räckte vattnet tills förstärkning kunde anlända och den närliggande byggnaden klarade sig i en situation där brandspridningen normalt sett hade skett. [6]

Efter denna händelse började diskussioner ta fart om att göra en ordentlig utredning om förmågan att absorbera strålning. [6]

### 1.1.1. Strålningsabsorption i vattendimma

En vattendimmas förmåga att absorbera värmestrålning avgörs av dropparnas storlek, en mindre droppstorlek ger en större sprayarea per volymenhet vatten, något som illustreras i Figur 1. En finare vattendimma, det vill säga mindre vattendroppar, har en bättre förmåga att absorbera värmestrålning. [5]

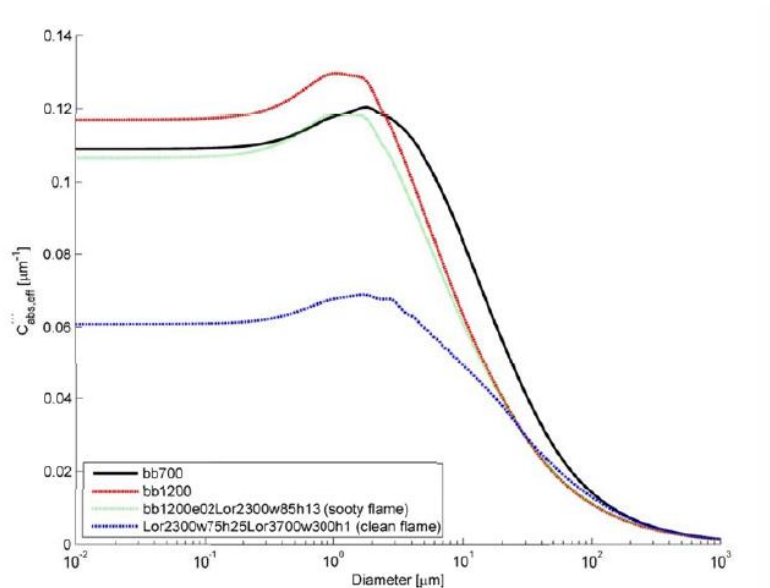


Figur 1 – En vattensprays area per volymenhet beroende på droppstorleken [5]

I Figur 2 visas hur  $C_{abs,eff}'''$  påverkas av vattendropparnas storlek i en vattendimma. Storheten  $C_{abs,eff}'''$  är ett mått på hur mycket strålning som absorberas per volymenhet vatten.

I Figur 2 nedan representerar den röda linjen en perfekt svartkropp med temperatur 1200 K, den svarta en svartkropp med temperatur 700 K, den gröna en sotig flamma och den blåa en ren flamma utan sotproduktion.





Figur 2 -  $C_{abs,eff}^{eff}$  som en funktion av droppstorlek för olika scenarion [5]

### 1.1.2. Droppstorlek från skärsläckare Coldcut™ Cobra

Små droppar ( $<2$  mm) är generellt sett näst intill sfäriska vilket gör att de enkelt kan beskrivas med endast en längdparameter till exempel diametern. [4]

Medellängddiametern,  $d_{10}$ , är det som även kallas för ”medeldiameter” och kan skrivas matematiskt som (1) där  $N$  är antalet droppar. [4]

$$d_{10} = \frac{\sum_{n=1}^N d_n}{N} \quad (1)$$

Sauter medellängd,  $d_{32}$ , är diametern av en droppe som har samma volym/yta-förhållande som hela sprayen har totalt. Av denna anledning är  $d_{32}$  en bra parameter för vattendimma med små droppar eftersom syftet med vattensprayen är att få en så stor effektiv yta som möjligt.

Matematisk kan den beskrivas enligt (2). [5]

$$d_{32} = \frac{\sum_{n=1}^N d_n^3}{\sum_{n=1}^N d_n^2} \quad (2)$$

Tidigare uppmätta droppstorlekar från skärsläckaren, med olika tillsatser, redovisas i Tabell 1 och Tabell 2 där Z är längden från munstycket.

Tabell 1 – Medeldiameter,  $d_{10}$  [5]

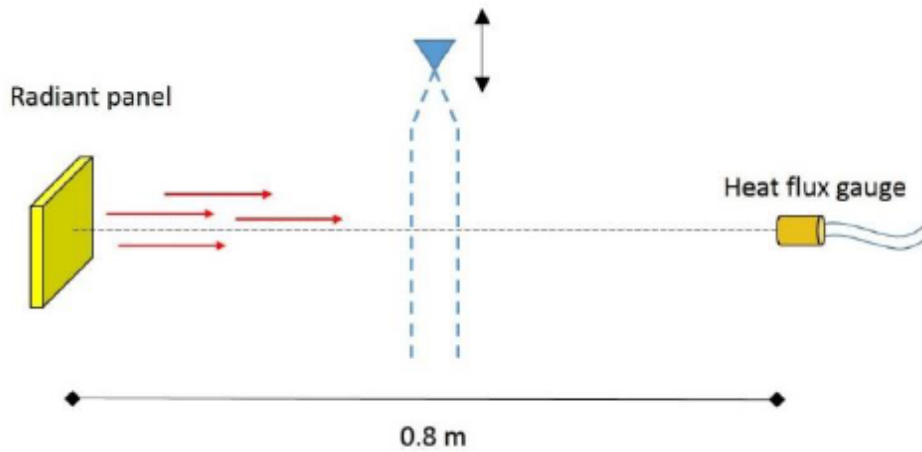
		Z [m]	8	10	15
$P_{\text{munstycke}}$	Tillsatsmedel	$d_{10}$ [ $\mu\text{m}$ ]			
260	-		46	62	86
260	A-skum			33	
260	X-fog			38	

Tabell 2 – Sauter medel längd,  $d_{32}$  [4]

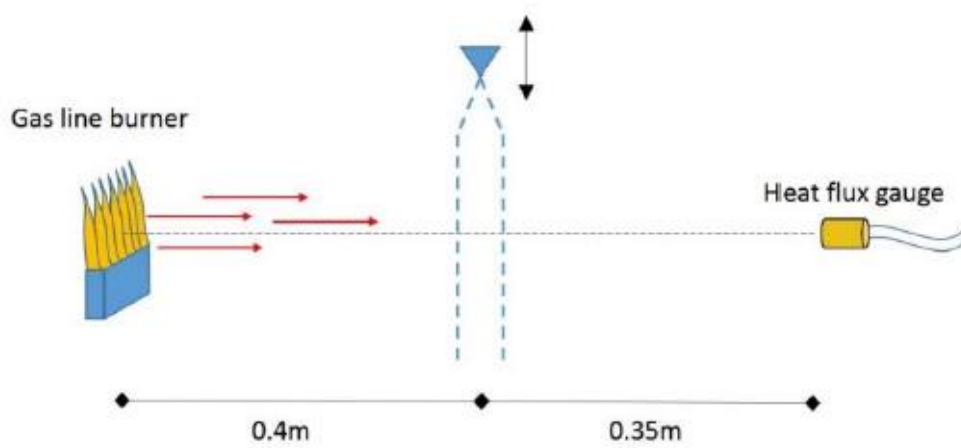
		Z [m]	8	10	15
$P_{\text{munstycke}}$	Tillsatsmedel	$d_{32}$ [ $\mu\text{m}$ ]			
260	-		160	170	196
260	A-skum			149	
260	X-fog			109	

### 1.1.3. Tidigare försök gällande strålningsabsorption i vattendimma

Det finns en mängd olika försök som behandlar strålningsabsorption i vattendimma. Ett försök gjordes 2015 med en vattendimma som lämnade munstycket vid 100 bar och ett flöde på 0,45 L/min. Uppställningen för försöket visas i Figur 3 och Figur 4. Värmeflödesmätarna sattes på olika höjder, vinkelrätt mot värmekällan, under munstycket. Värmeflödesmätare satts även med en vinkel på  $\pm 5^\circ$  mot värmekällan [3].



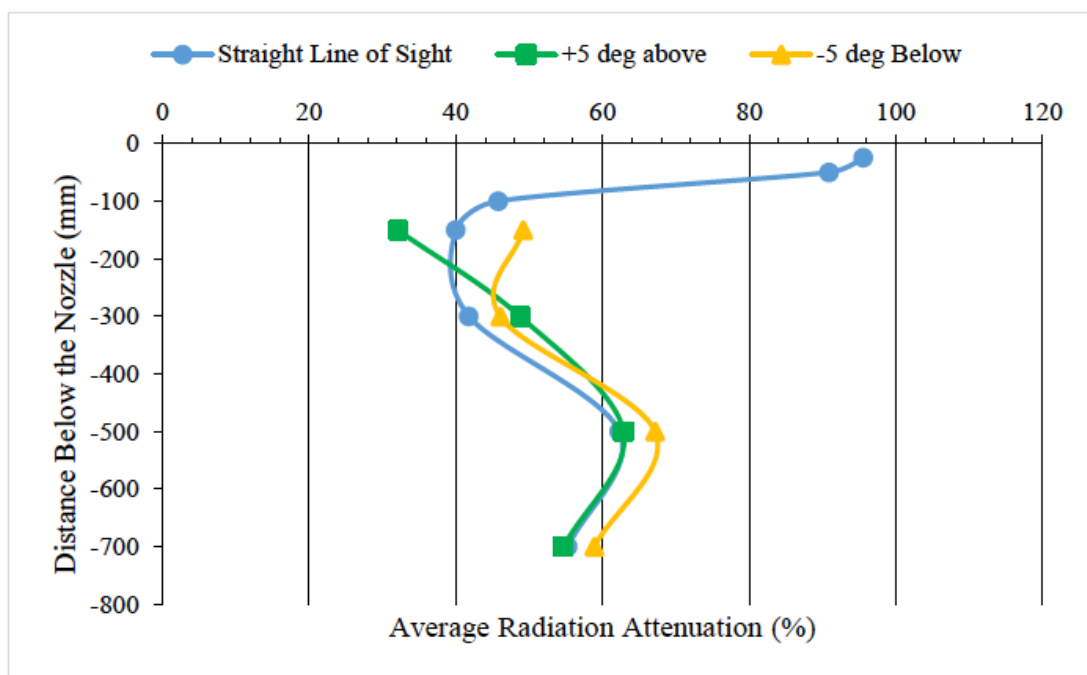
Figur 3 – Försökupställning för försök som utfördes 2015 [3]



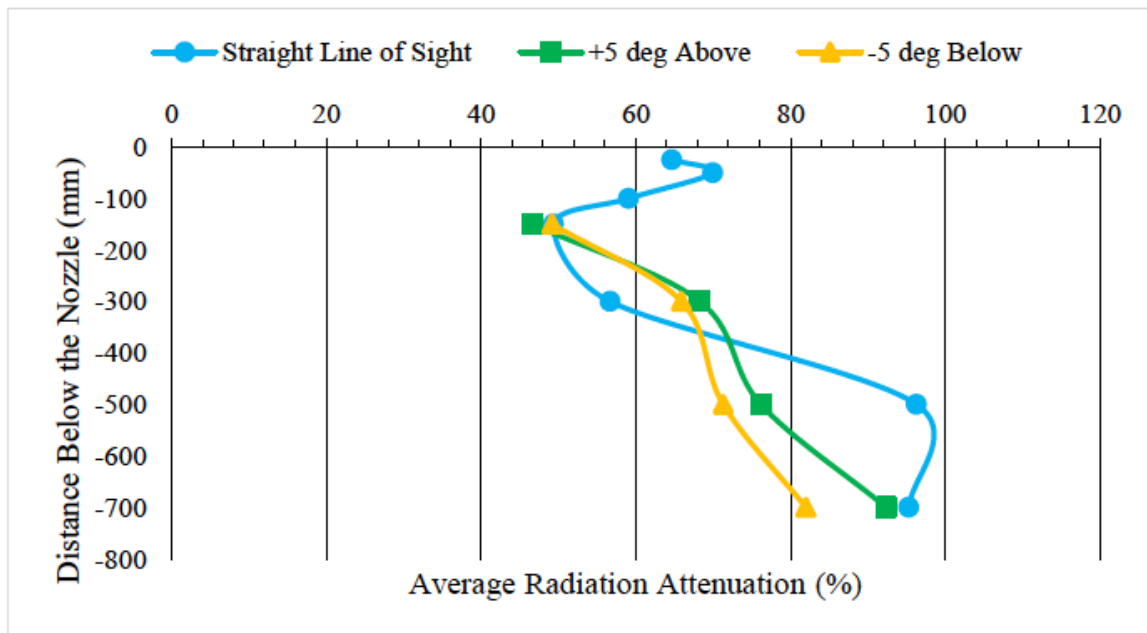
Figur 4 - Försökupställning för försök som utfördes 2015 [3]

Resultatet från de båda uppställningarna presenteras nedan i Figur 5 och Figur 6. Dämpningen är definierad enligt (3).

$$Dämpning = 1 - \frac{\dot{q}_{rad,med\ dimma}''}{\dot{q}_{rad,utan\ dimma}''} \quad (3)$$



Figur 5 – Strålningsdämpningen på olika höjder under munstycket för "Radiant panel" [3]



Figur 6 - Strålningsdämpningen på olika höjder under munstycket för "Gas line burner" [3]

## 1.2. Syfte

Syftet med denna rapport är att undersöka Cobrans förmåga att absorbera värmestrålning. Resultatet är tänkt att ligga till grund för utvecklandet av tekniker och taktiker när det gäller brandbekämpning.

## 1.3. Avgränsningar

Endast coldcut<sup>TM</sup> cobra med ett munstyckstryck på 260 bar kommer att undersökas. Strålningskällan kommer bestå av en gasolrigg med maxeffekt av 3 MW.

## 2. Teori

Detta avsnitt redovisar den teori som är nödvändig för att kunna genomföra de delar som redovisas i metoden.

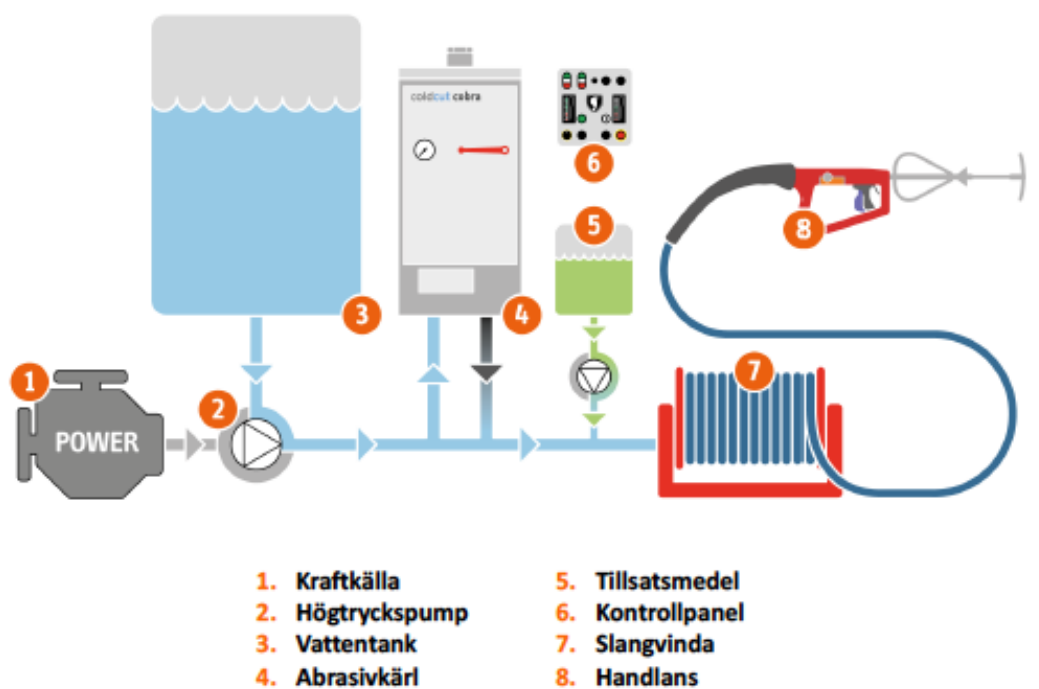
### 2.1. Skärsläckaren Coldcut™ Cobra

Under 1990-talet genomförde Luleå räddningstjänst försök för att hitta nya metoder för håltagning i tak på brinnande byggnader. 1996 redovisades resultaten från försöken till dåvarande Statens räddningsverk som i sin tur gjorde en förstudie av användning av trycksatt vatten i kombination med skärmedel. Under denna studie visade det sig att förutom den skärande förmågan så hade även metoden en betydande effekt av att dämpa ett brandförlopp. Utvecklingsarbetet fick en ny inriktning och på så sätt skapades skärsläckaren. [7]

Den patentskyddade produkten coldcut™ cobra är ett komplett släcksystem som är uppbyggd utav åtta komponenter.

- Kraftkälla
- Vattenpump
- Vattentank
- Abrasivkärl
- Eventuellt tillsatsmedel
- Manöverpanel
- Slangvinda
- Handlans

En illustration av systemet se i Figur 7.



Figur 7 – Schematisk illustration av Coldcut™ Cobra [1]

Systemet monteras oftast på räddningstjänstens fordon varpå man använder fordonets befintliga motor som kraftkälla. Vattenpumpen tar upp vatten från vattentanken och trycksätter den till 280 bar. På handlansen finns två avtryckare, den ena styr det trycksatta vattnet och den andra styr om abrasiv ska blandas in i vattnet. Abrasiv utgörs av en blandning av järn- och kisloxid eller aluminiumoxid med en kornstorlek som är ca 0,6 mm och fungerar som skärmedel. Normalt rymmer abrasivtanken 20 liter vilket räcker till ca 5 minuters skärning, värt att notera är att själva vattnet i sig har en skärande effekt som endast förstärks av abrasivet. [6]

Vattnet och abrasivet leds sedan vidare, via en 80 meter formstabil gummislang, till handlansen och sedan vidare ut till munstycket där vattnet blir till en tät, fin vattendimma. Vattnet lämnar munstycket i en hastighet av ca 220 m/s [7]. I Figur 8 ses spraybilden som bildas vid användning av skärsläckaren.



Figur 8 – Spraybild från skärsläckare [1]

## 2.2. Adiabatisk yttemperatur

Den termiska påverkan mot en yta styrs av 4 oberoende parametrar, strålningstemperaturen ( $T_r$ ), gastemperaturen ( $T_g$ ), ytans emissivitet ( $\varepsilon$ ) och övergångskoefficienten genom konvektion ( $h_c$ ). Emissiviteten är en materialparameter mellan 0-1 där värdet 1 representerar en perfekt svartkropp.

Strålningstemperaturen är direkt kopplad till den infallande strålningen enligt ekvation (4). [8]

$$\dot{q}_{inc}'' \equiv \sigma \cdot T_r^4 \quad (4)$$

Nettobidraget från den infallande strålningen, som  $T_r$ , kan enligt Stefan Boltzmanns lag om svartkroppsstrålning uttryckas som ekvation (5).

$$\dot{q}_{rad}'' = \varepsilon \cdot \sigma (T_r^4 - T_s^4) \quad (5)$$

Gastemperaturen bidrar till värmeflöde via konvektion och kan beskrivas som en linjär funktion enligt ekvation (6).

$$\dot{q}_{con}'' = h_c (T_g - T_s) \quad (6)$$

Den totala övergången av värme till en yta kan då uttryckas som summan av nettobidraget av strålningen och konvektionen med hjälp av ekvation (5) och (6).

$$\dot{q}_{tot}'' = h_c (T_g - T_s) + \varepsilon \cdot \sigma (T_r^4 - T_s^4) \quad (7)$$

Vid en viss given temperatur på ytan kommer värmeövergången via konvektion och strålning befinna sig i jämvikt och det totala värmeutbytet blir noll, denna temperatur kallas för den *adiabatiska yttemperaturen* [9]. Detta infinner sig när en kropp inte längre kan absorbera mer värme och kroppen befinner sig i steady-state. Ekvation (7) kan då omformuleras till följande.



$$0 = h_c(T_g - T_{AST}) + \varepsilon \cdot \sigma(T_r^4 - T_{AST}^4) \quad (8)$$

Om den infallande strålningen är dominerande kan därmed den adiabatiska yttemperaturen lösas med en itereringsprocess. Annars måste den lösas enligt en 4:e grads ekvation. Itereringskvationen kan fås från (8) och skrivs om enligt (9). Där den konvektiva värmeövergångskoefficienten,  $h_c$ , beräknas enligt Bilaga A. Den konvektiva övergångskoefficienten för en yta som är ca 100 °C i rumstemperatur är mellan 8-9 W/(m<sup>2</sup>K). [9]

$$T_{AST}^{i+1} = \sqrt[4]{T_r^4 + \frac{h_c}{\varepsilon \cdot \sigma} (T_g - T_{AST}^i)} \quad (9)$$

### 2.3. Vinkelfaktor

Nettovärmestrålningen som träffar en yta beror på förhållandet mellan den strålade ytan och den absorberande ytan. Begreppet vinkelfaktor beskriver hur stor del av den strålade ytans värmestrålning som den absorberande ytan känner av. Denna faktor är beroende av geometrin på ytorna, avstånd och vinklar. Vinkelfaktorn antar ett värde mellan 0-1 där den infallande strålningen mot en yta (yta 2) från en annan emitterande yta (yta 1) definieras enligt ekvation (10).

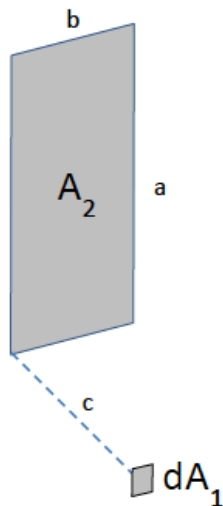
$$\dot{q}_{inc,1-2}'' = F_{1-2} \dot{q}_{emi,1}'' \quad (10)$$

Vinkelfaktorn beräknas på olika sätt beroende på dess geometriska former, nedan följer metoden att beräkna den då ett plant element är parallellt med dess strålningskälla samt vinkelrätt mot strålningskällan. [9]

Plant element parallellt mot strålningskällan beräknas enligt ekvation (11) och illustreras i Figur 9.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \quad (11)$$

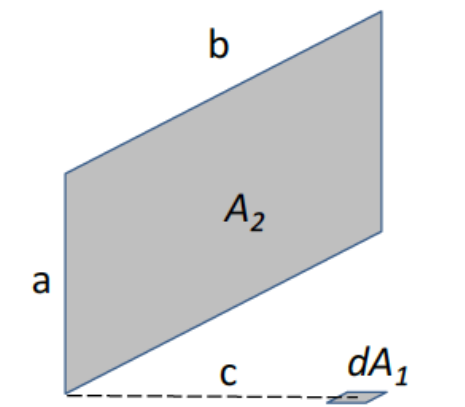
Där  $X = \frac{a}{c}$  och  $Y = \frac{b}{c}$



Figur 9 – Vinkelfaktor för plan parallellt till strålningskällan [9]

Plant element vinkelrätt mot strålningskällan beräknas enligt ekvation (12) och illustreras i Figur 10.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{b}{c} \right) - \frac{c}{\sqrt{a^2+c^2}} \tan^{-1} \left( \frac{b}{\sqrt{a^2+c^2}} \right) \right] \quad (12)$$



Figur 10 – Vinkelfaktor för plan vinkelrätt till strålningskällan [9]

## 2.4. Flamhöjd

Flammans medelhöjd kan uppskattas genom Heskestads plymekvation som är beroende av effekten på brandkällan samt diametern på en cirkulär brandkälla. Är brandkällan ej cirkulär använder man sig av den diametern brandkällan skulle haft om den var cirkulär.

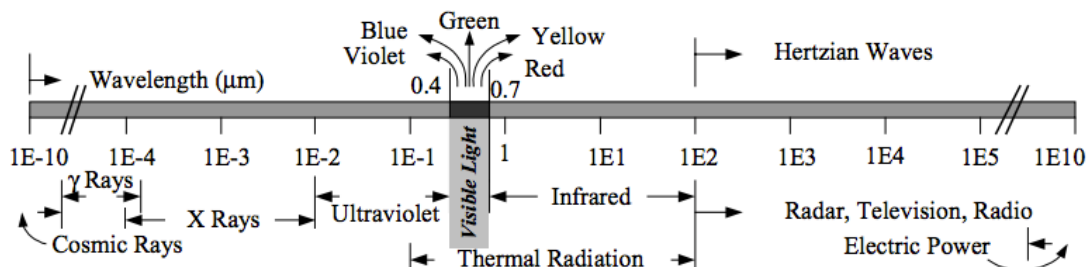
Höjden beräknas enligt (13). [10]

$$L = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad (13)$$

## 2.5. Elektromagnetiskt spektrum

Till det elektromagnetiska spektrumet hör strålning med hög energi på ena sidan, så som den kosmiska strålningen, samt strålning med låg energi på den andra sidan, så som radiovågor.

Figur 11 visar en illustration av elektromagnetiska spektra med avseende på våglängd. [11]



Figur 11 – Elektromagnetisk spektrum med avseende på våglängd i logaritmisk skala [11]

De våglängder som genererar mest värmestrålning och är de vanligaste i brandscenarion befinner sig på ett intervall mellan  $1\text{-}10$   $\mu\text{m}$ .

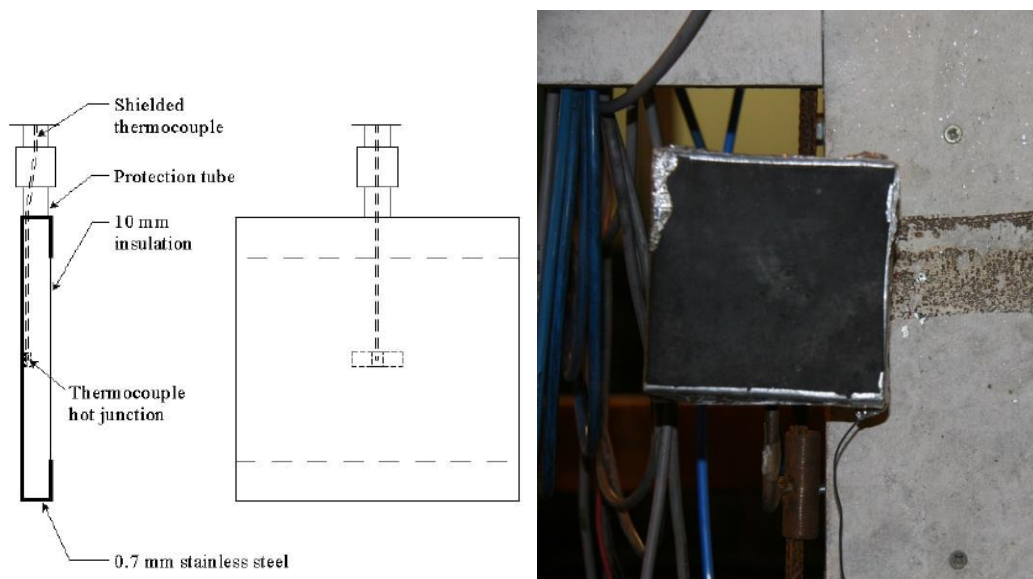
## 2.6. Mätutrustning

I detta avsnitt redovisas teorin angående de mätutrustningar som används under försöken.

### 2.6.1. Standard plattermoelement

Ett plattermoelement består av en 100x100 mm stålskiva med en tjocklek på 0,7 mm och en 10 mm tjock isoleringsskiva på baksidan. Fäst i mitten på baksidan av stålskivan är ett termoelement som mäter stålskivans temperatur. Stålskivan kan bestå av olika tjocklekar och olika stål. En illustration samt bild av ett plattermoelement visas i Figur 12.

På grund av plattermoelementets stora yta, samt att den är isolerad på baksidan, mäter den temperaturen på en yta som inte kan absorbera mer värme, det vill säga den adiabatiska yttemperaturen. [12]



Figur 12 – Plattermoelement i genomskärning [9]

Med hjälp av en värmebalans, och antagandet att stålskivan har en uniform temperatur, där vi tar hänsyn till att stålskivan värms upp får vi följande uttryck [13]:

$$\varepsilon_{PT}\dot{q}_{inc}'' - \varepsilon_{PT}\sigma T_{PT}^4 + h_{PT}(T_g - T_{PT}) + K_{PT}(T_g - T_{PT}) = C_{PT}\frac{dT_{PT}}{dt} \quad (14)$$

Ekvation 14 kan delas upp i fyra termer där den första termen från vänster är absorberad värmestrålning i stålskivan, andra är värmestrålning som emitteras från stålskivan, tredje är värmeöverföring via konvektion och fjärde är värme som förloras på grund av ledning genom stålskivan och isoleringen. Termen till höger beskriver hur snabbt värme lagras i stålskivan. Eftersom stålskivan uppnår den adiabatiska yttemperaturen kommer den högra termen vara lika med noll.  $K_{PT}$  antas vara en konstant som är specifik för olika typer av plattermoelement och  $C_{PT}$  antas vara specifika värmekapaciteten för stålskivan plus en tredjedel av den specifika värmekapaciteten för isoleringen [9], [14].

Den infallande strålningen kan härledas från ekvation (14).

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 - \frac{1}{\varepsilon_{PT}} \left[ (h_{PT} + K_{PT}) \cdot (T_g - T_{PT}) - C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt} \right] \quad (15)$$

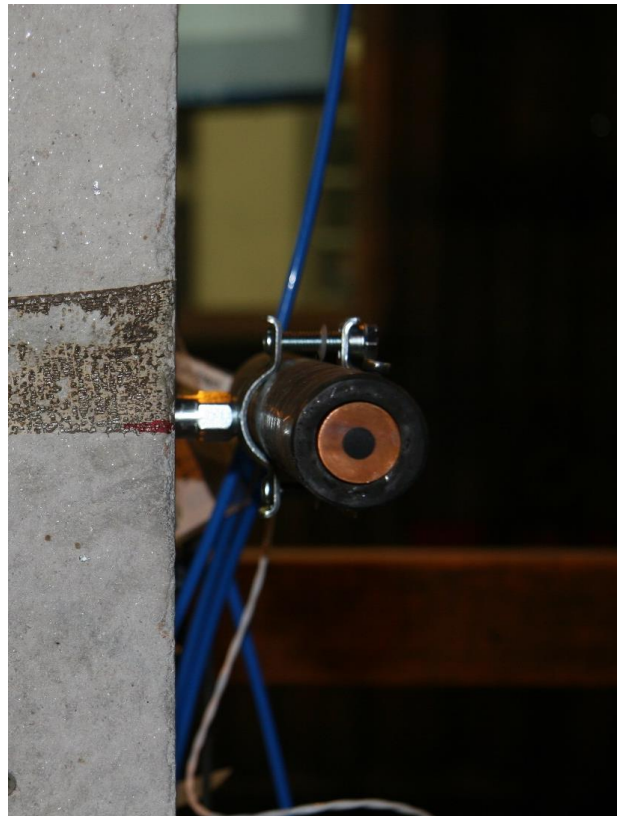
## 2.6.2. Plattermoelement värmeflödesmätare (PTHFM)

En annan variant av plattermoelement, som lämpar sig bättre för mätning av infallande strålning i rumstemperatur, finns och den skiljer sig något från beskrivningen ovan.

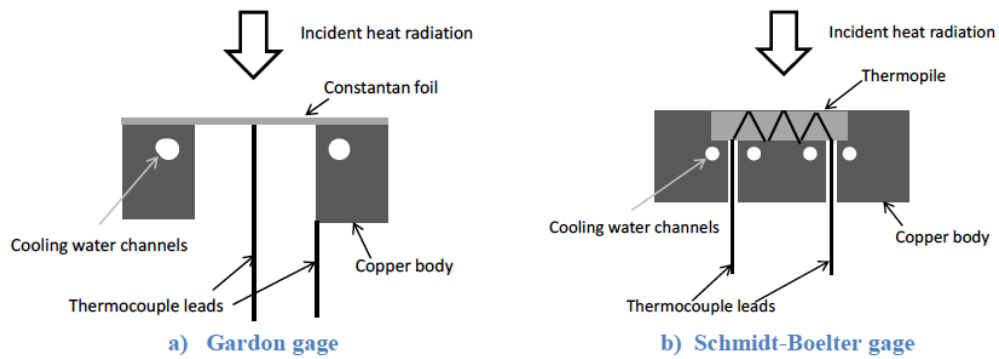
Istället för en 0,7 mm stålskiva består den av en 0,5 mm tjock stålskiva, för att minimera den lagrade värmen i plattan och därmed förbättra responstiden för mätningen. Dessutom är isoleringen 30 mm istället för 10 mm för att minska värmeförluster. Allt förutom framsidan är omslutet av ett skal i rostfritt stål [15]. Metodiken och beräkningsgången är densamma.

### 2.6.3. Värmeffödesmätare

De vanligaste värmeffödesmätarna är de så kallade Gardon eller Schmidt-Boelter mätare. Exempel på värmeffödesmätare visas i Figur 13. Dessa mätare registrerar det totala värmeffödet, inklusive konvektion. Eftersom värmeffödet som mäts får bidrag från konvektionen blir osäkerheten relativt stor (upp till 25 % osäkerhet vid ogynnsamma förhållanden) då värmeffödet på grund av konvektion är beroende av en mängd faktorer så som flödes hastighet, placering, design etc. [9] I Figur 14 ses värmeffödesmätare i genomskärning.



Figur 13 – Schmidt-Boelter mätare (Foto: Ulf Wickström)



Figur 14 – Värmeflödesmätare i genomskärning [9]

Gardon och Schmidt-Boelter mätare kalibreras enligt ISO 14934 i en sfärisk ugn med en uniform temperatur. Man antar en infallande strålning enligt svartkroppstrålning och försummar bidraget från konvektion, vilket ger Ekvation (16).

$$\dot{q}_{hfm}'' = \varepsilon_{hfm} \sigma (\varphi T_{ugn}^4 - T_{hfm}^4) \quad (16)$$

Där  $\varphi$  är en konfigurationskonstant beroende på hur testet är utfört och  $T_{hfm}$  är värmeflödesmätarens (heat flux meter) yttemperatur. Temperaturen,  $T_{hfm}$ , antas alltid vara lika med kylvattnets temperatur då den kyls kontinuerligt av vattnet. Själva kalibreringen går ut på att utsätta mätaren för flera olika nivåer av kända ugnstemperaturer, en elektrisk spänning bildas som noteras för varje känd temperatur. Denna spänning används för att ge ett linjärt samband mellan spänningen som bildas vid temperaturskillnaderna och  $\dot{q}_{hfm}''$ .

Under användning av värmeflödesmätare används värmeflödesekvationen, Ekvation (17).

$$\dot{q}_{hfm}'' = \varepsilon_{hfm} (\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{hfm}^4) + h_{hfm} (T_g - T_{hfm}) \quad (17)$$

Från Ekvationen (17) kan den infallande strålningen härledas enligt Ekvation (18).

$$\dot{q}_{inc}'' = \frac{1}{\varepsilon_{hfm}} [\dot{q}_{hfm}'' - h_{hfm} (T_g - T_{hfm})] + \sigma T_{hfm}^4 \quad (18)$$

#### 2.6.4. FTIR Spektrometer

En spektrometer är ett optiskt instrument som delar upp ljus i dess olika spektra för att kunna analysera de våglängder som det specifika ljuset innehåller.

Det finns olika typer av användningsområden för spektrometer, en variant av spektrometer är FTIR-spektrometer (Fourier Transform InfraRed).

En FTIR-spektrometer används för att insamla data i det infraröda spektrat och kan mäta bland annat hur mycket energi som emitteras från en kropp. [16]



## 3. Metod

I detta avsnitt redovisas samtliga metoder som användes för att erhålla resultatet.

### 3.1. Litteraturstudier

Inledningsvis utfördes en litteraturstudie för att undersöka vad tidigare forskning i området kommit fram till och vilka förväntade resultat som fanns för just detta specifika försök.

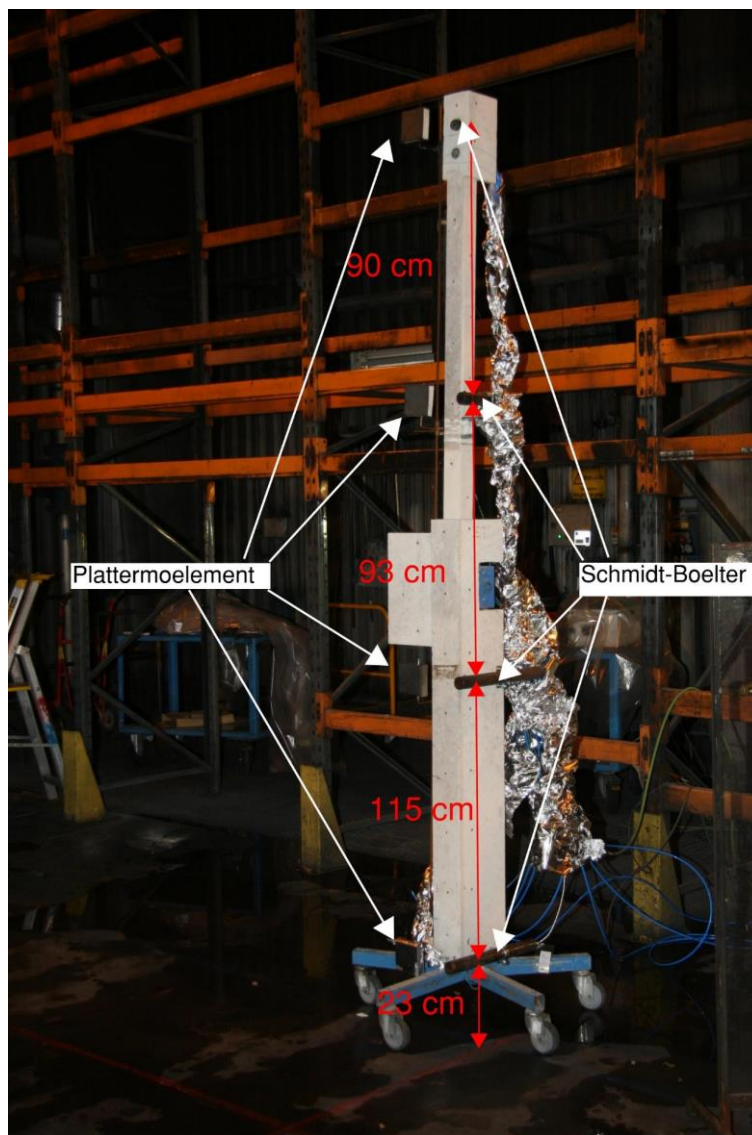
Vidare utfördes också en undersökning avseende vilken mätutrustning som skulle passa försöket bäst samt hur respektive mätutrustning fungerar.

### 3.2. Försöksuppställning

Det finns olika sätt att mäta den infallande strålningen från en brandkälla. För att skapa redundans i mätningarna och undvika att en enstaka mätutrustning kan falla valdes ett flertal olika sätt att mäta den infallande strålningen.

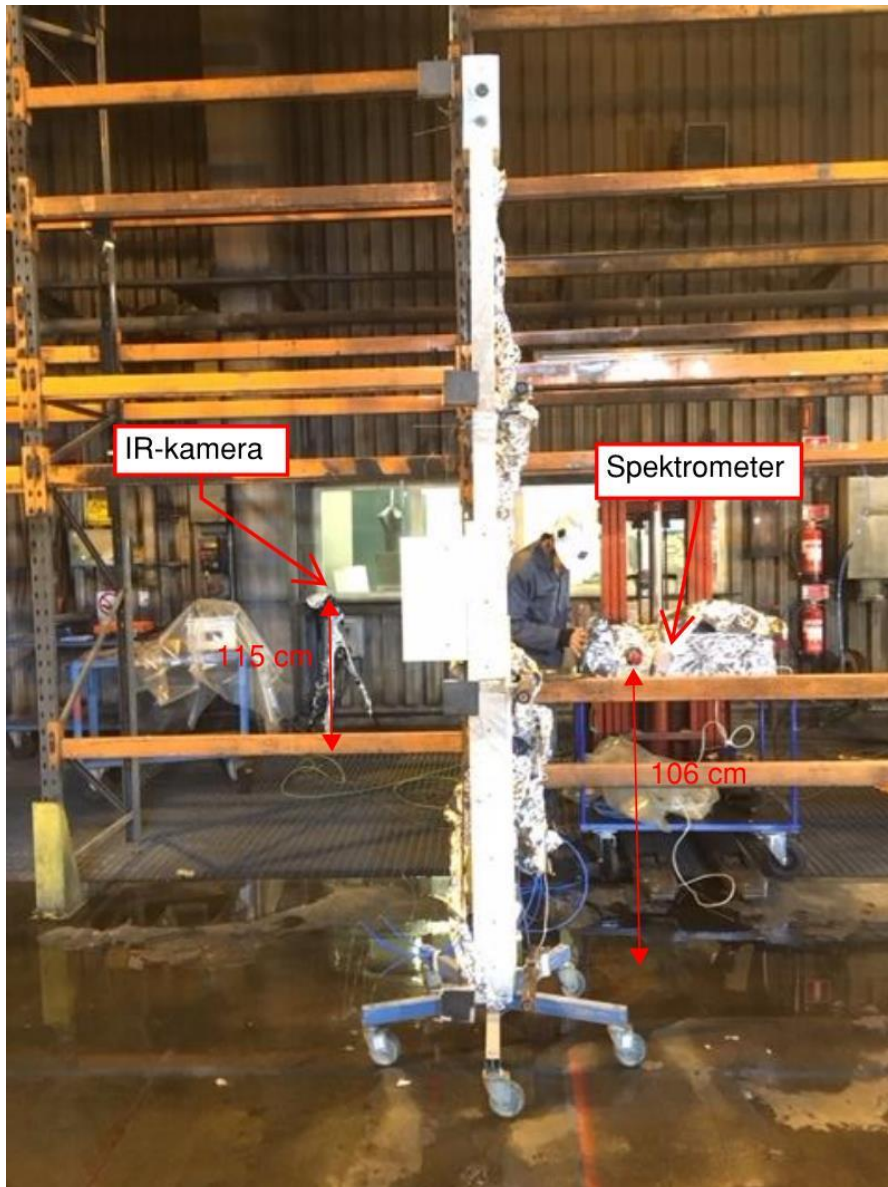
De sätt som valdes som primära mätkällor var Schmidt-Boelter (HFM), plattermoelement (PTHFM) samt spektrometer. Detaljer hur respektive mätutrustning fungerar finns i 2.6.2, 2.6.2 och 2.6.3.

Eftersom flammen kommer variera i tjocklek över höjden samt att vattendimman var begränsad till att endast täcka en del av flammen bestämdes det att mätpunkterna skulle placeras på olika höjder. HFM och PTHFM placerades jämte varandra i olika höjder för att kunna jämföra resultaten från de båda mätteknikerna, respektive höjder och hur placeringen såg ut visas i Figur 15.



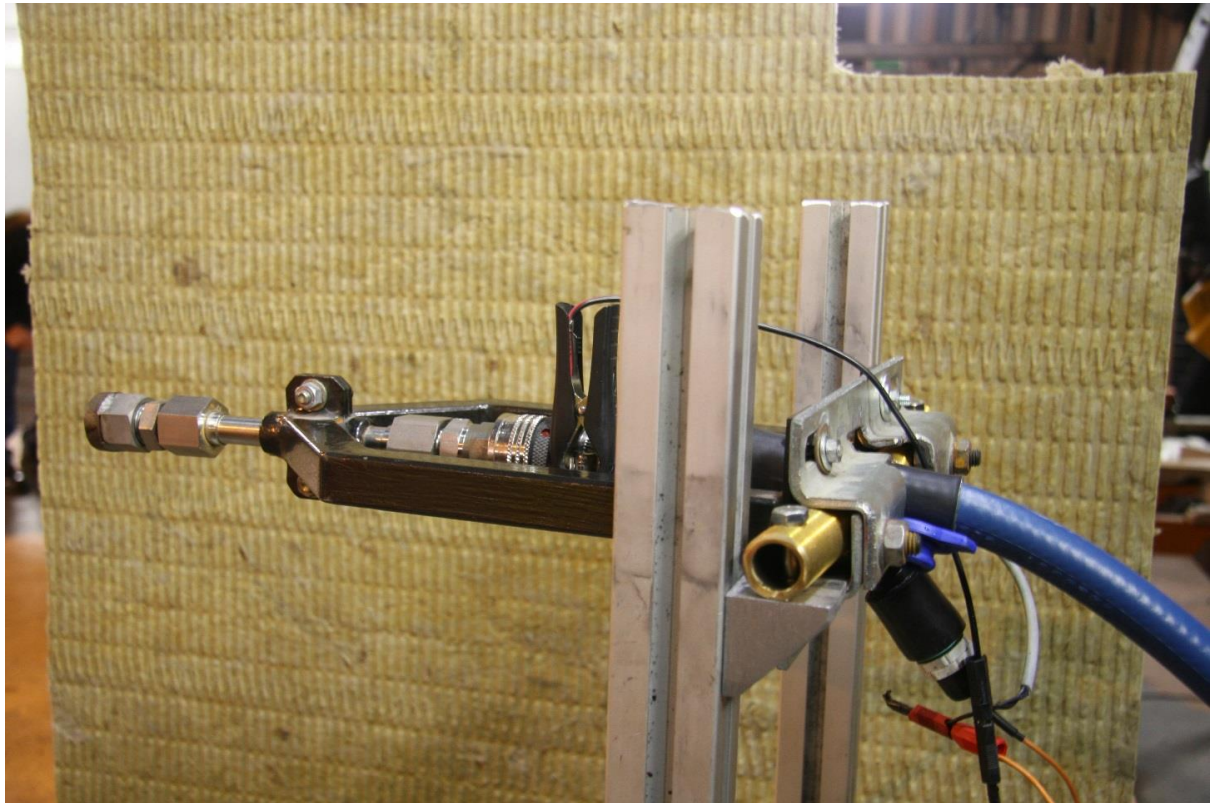
Figur 15 – Placering av mätpunkterna i höjdlid (Foto: Ulf Wickström)

Utöver placeringen av dessa mätpunkter så placerades även en spektrometer av modellen Bruker Vertex 70 FT-IR (med detekteringsgräns 1-25 mikrometer) [17] på en fast plats under samtliga försök. Detta gjordes för att kunna studera, på ett mer precist sätt, hur spektrat förändras samt den energin som dimman dämpar, där dimman är som bredast. För att rent visuellt kunna se de förändringarna som blir då vattendimman dämpar värmestrålningen användes även en IR-kamera. placeringen av denna utrustning visas i Figur 16



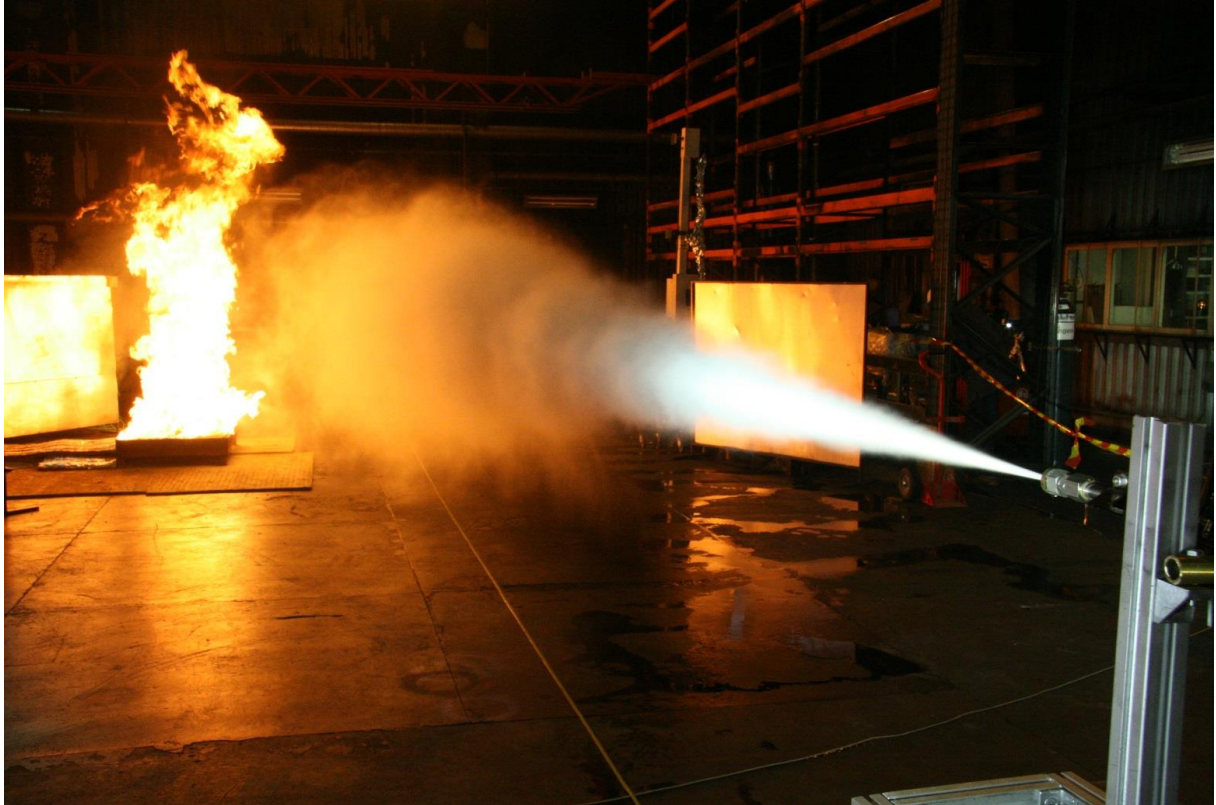
Figur 16 – Höjder för spektrometer och IR-kamera (Foto: Ulf Wickström)

För att säkerställa att vattendimman inte är variabel i de olika försöken placerades skärsläckaren på en fast rigg som var låst mellan varje försök. Av praktiska skäl användes inte den faktiska lansen som normalt sätt används vid användande av skärsläckaren, utan bara själva slangsystemet och munstycket. Dock är prestandan för systemet oförändrat och motsvarade fortfarande samma effekt som om lansen hade varit monterad på. Den fasta riggen med skärsläckaren monterad på visas i Figur 17.



*Figur 17 – Riggen för skärsläckaren (Foto: Ulf Wickström)*

Sprayen riktades mellan en gasolbrännare med effekt på 3 MW och de olika mätpunkterna. För att förstärka strålningen sattes skärmar bakom gasolriggen. Flödesscheman för försöken redovisas separat för vardera försök nedan. I Figur 18 ses hur spraybilden går mellan gasolbrännaren och mätpunkterna.



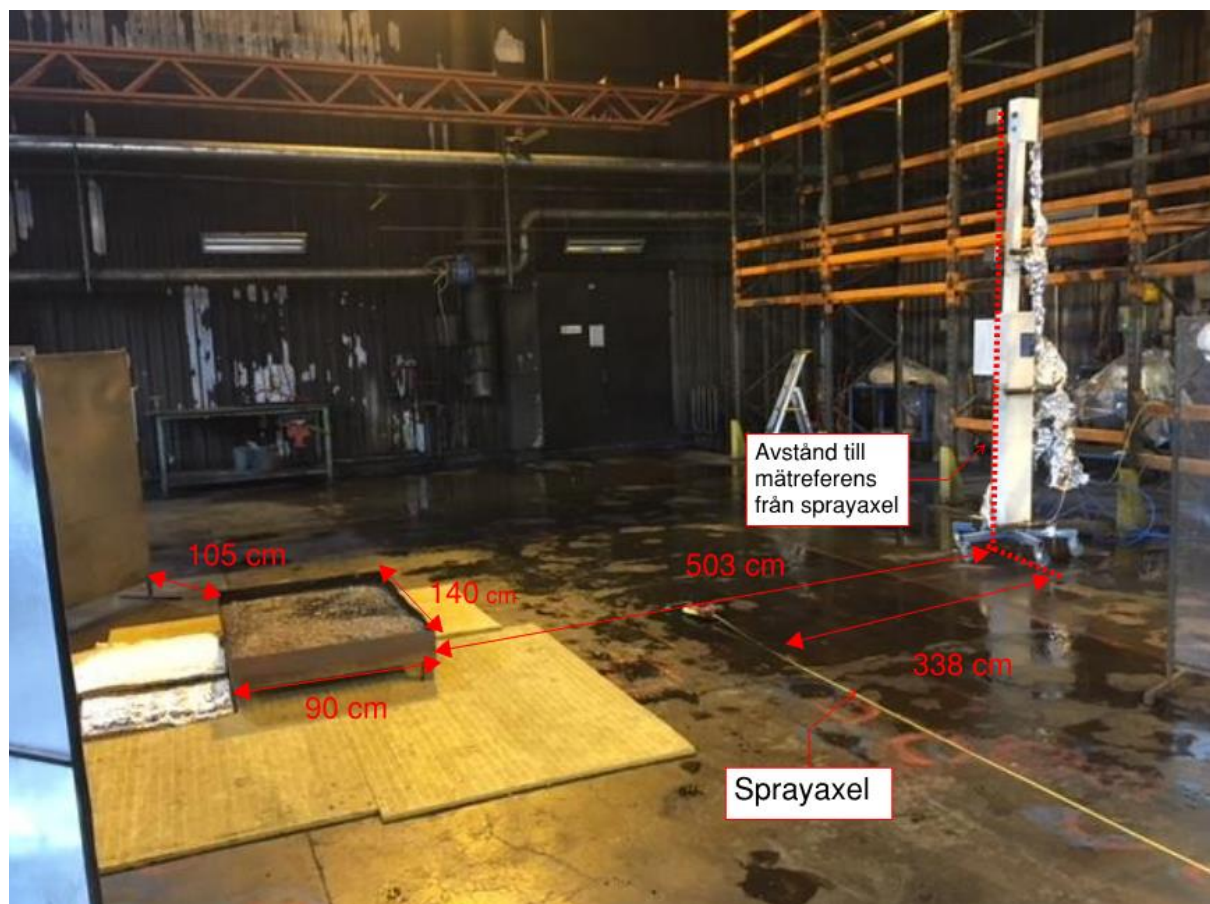
*Figur 18 – Spraybild mellan gasolbrännare och mätpunkterna (Foto: Ulf Wickström)*

### 3.2.1. Försök 1

För att erhålla resultat från ett referensförsök utfördes ett försök där endast gasolbrännaren var aktiv, detta var till stor del för att kunna ha som känslighetsanalys för att eliminera att andra faktorer kunde ha inverkan på den infallande strålningen. Angivna mått visas i Figur 19.

Avstånd mellan skärsläckarens munstycke till mätreferens: **10 m**

Höjd från golv till skärsläckarens munstycke: **139 cm**



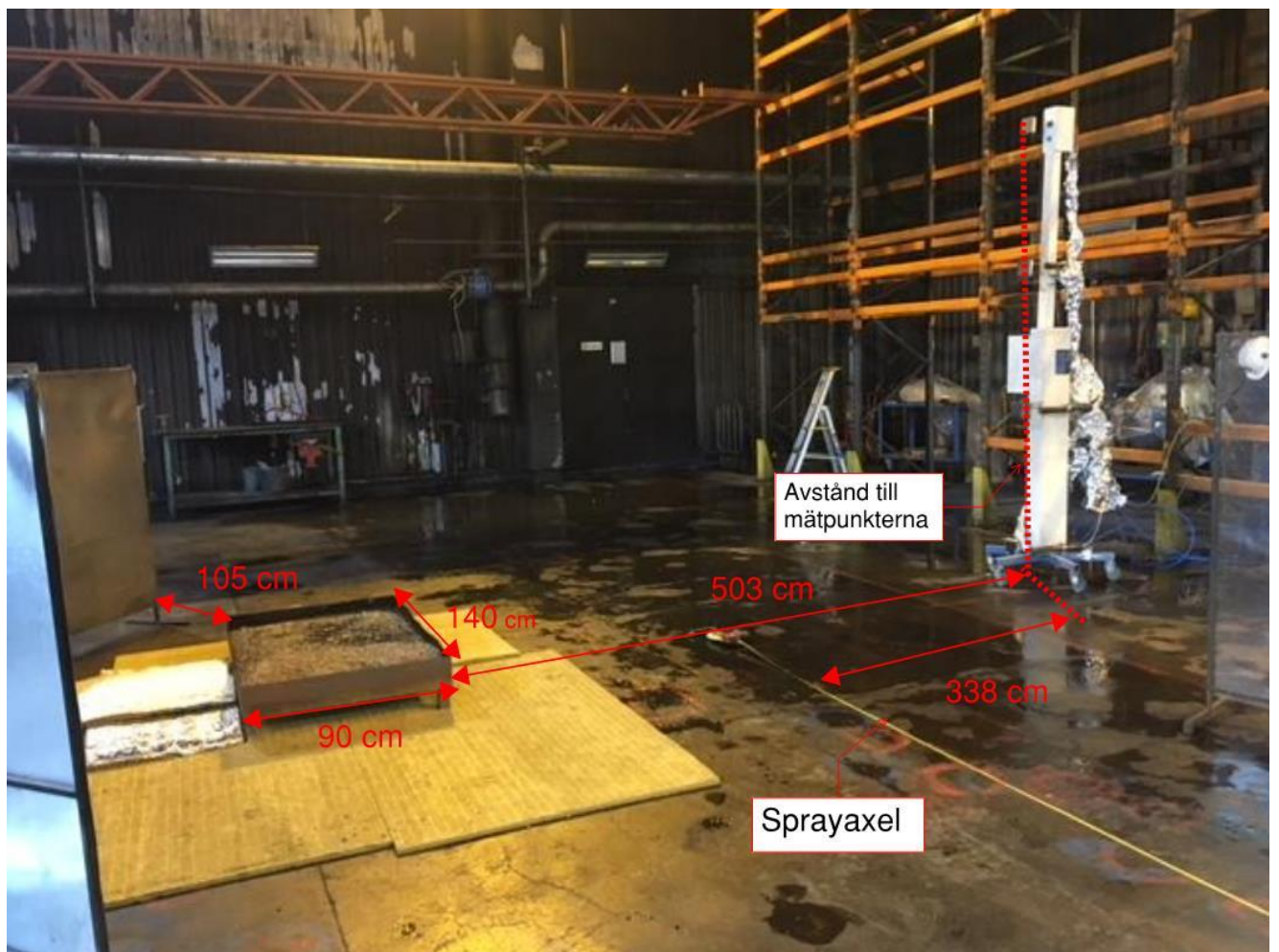
Figur 19 – Mått i försök 1 (Foto: Ulf Wickström)

### 3.2.2. Försök 2

Samma försöksuppställning som försök 1 användes även i försök 2 men denna gång med skärsläckarens vattendimma aktiv.

Avstånd mellan skärsläckarens munstycke till mätpunkterna: **10 m**

Höjd från golv till skärsläckarens munstycke: **139 cm**



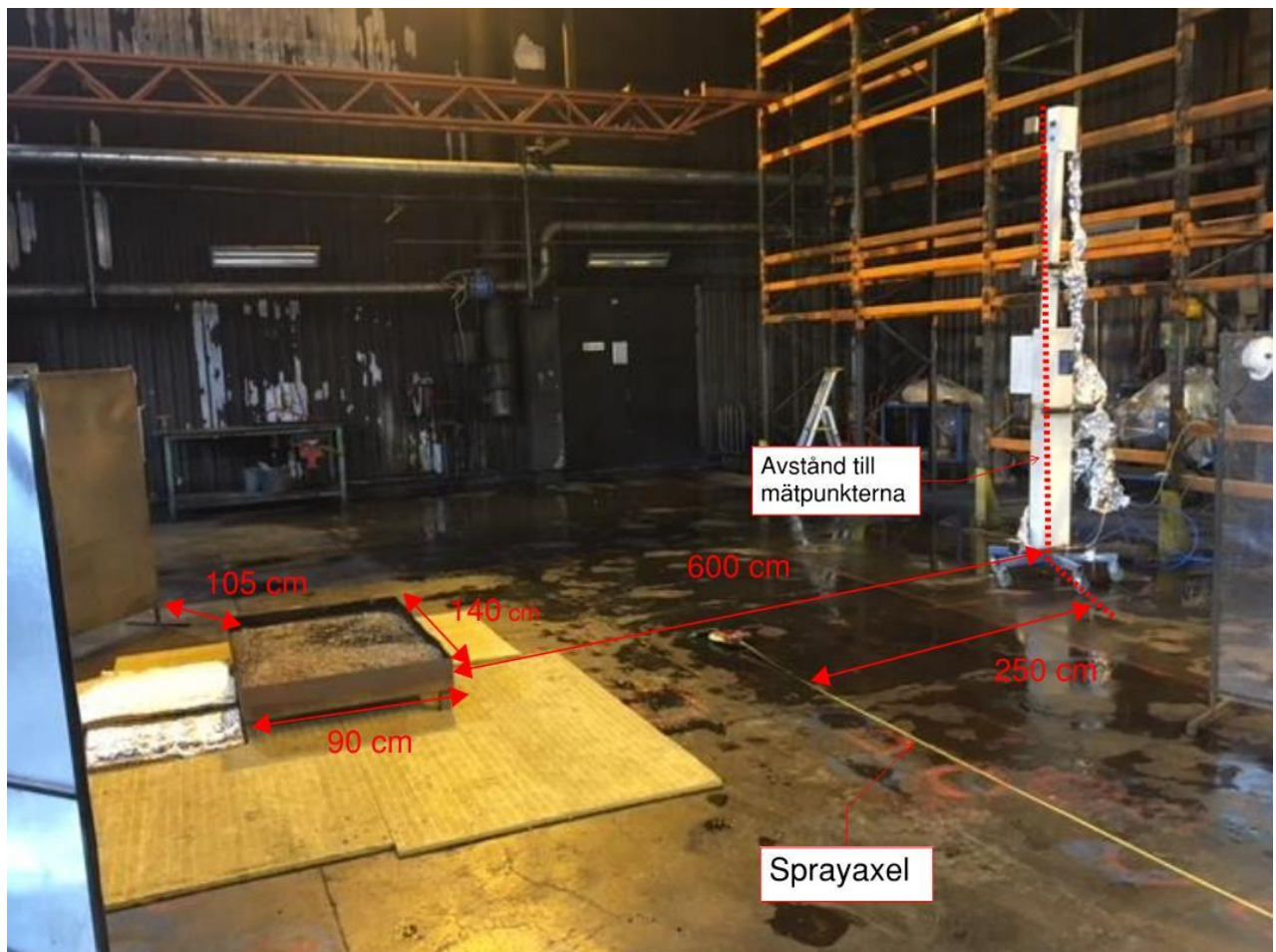
Figur 20 – Mått i försök 2 (Foto: Ulf Wickström)

### 3.2.3. Försök 3

Notera att i försök 3 utökades avståndet mellan brandkällan och mätpunkterna för att säkerställa att likvärdigt beteende uppstod för dämpningen av strålning. Detta för att vinddraget från sprayen skulle påverka flambilden så lite som möjligt.

Avstånd mellan skärsläckarens munstycke till mätpunkterna: **10 m**

Höjd från golv till skärsläckarens munstycke: **139 cm**



Figur 21 – Mått i försök 3 (Foto: Ulf Wickström)



### 3.2.4. Försök 4

I försök 4 flyttas skärsläckaren fram 2 m jämfört med de tidigare försöken. Detta för att undersöka om det skulle ha någon större påverkan på hur mycket av flammen som vattendimman täcker och därmed förändrar dämpningen av värmestrålning.

Avstånd mellan skärsläckarens munstycke till mätpunkterna: **8 m**

Höjd från golv till skärsläckarens munstycke: **139 cm**



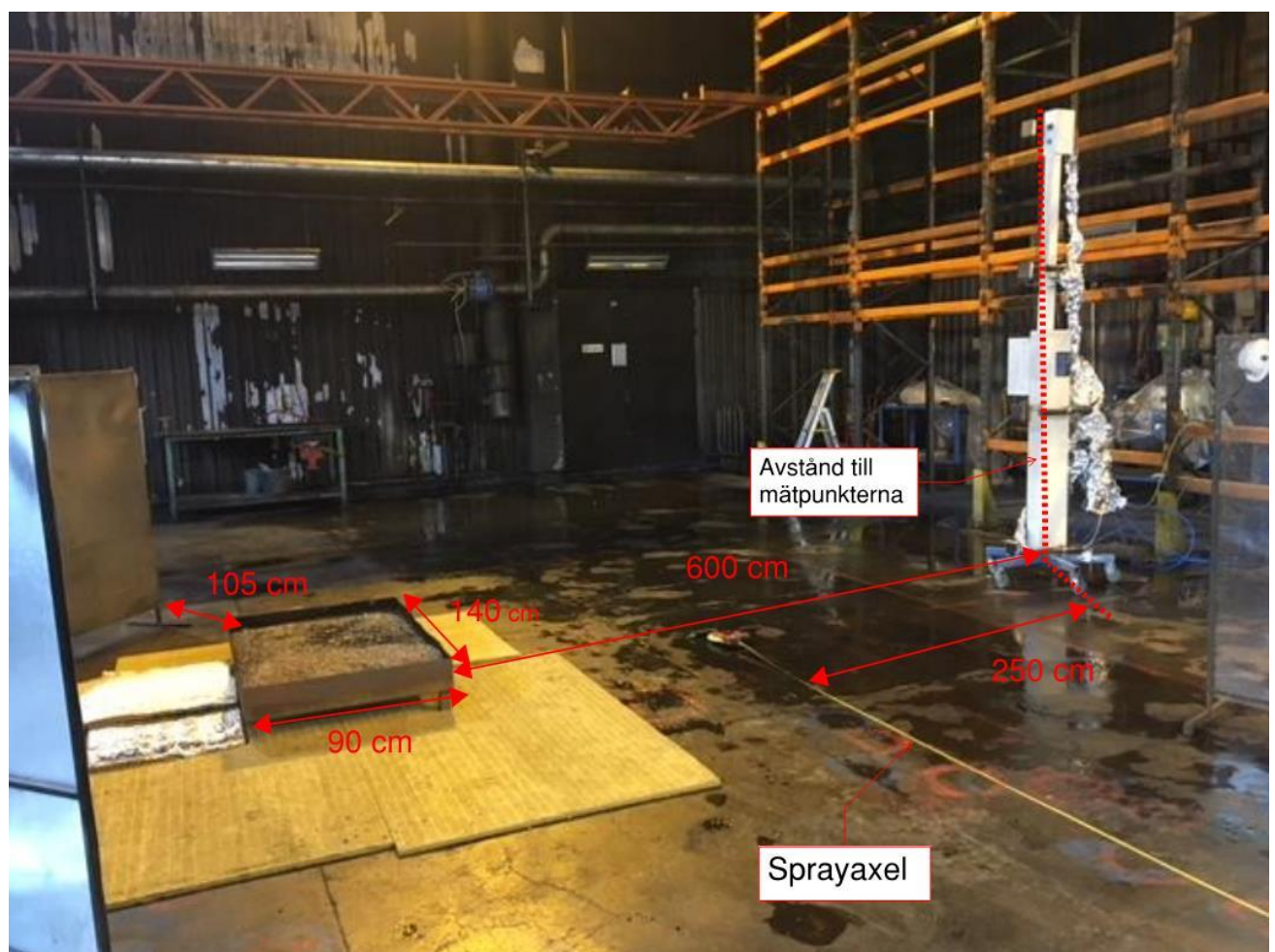
Figur 22 – Mått i försök 4 (Foto: Ulf Wickström)

### 3.2.5. Försök 5

I försök 5 sänktes skärsläckarens rigg med 39 cm för att undersöka om en höjdskillnad skulle kunna ha en större påverkan på resultatet.

Avstånd mellan skärsläckarens munstycke till mätpunkterna: **8 m**

Höjd från golv till skärsläckarens munstycke: **100 cm**



Figur 23 – Mått i försök 5 (Foto: Ulf Wickström)

### 3.3. Dataanalys

Från försöken erhöles mätdata i form av infallande strålning från HFM, temperaturmätningen i PTHFM samt uppmätt energi från spektrometern. Den data som behövde processas var temperaturmätningarna i PTHFM som omvandlades till en infallande strålning i enlighet med avsnitt 2.6.1. Övriga data kunde erhållas direkt från mätningarna.

## 4. Resultat

Nedan redovisas resultatet från respektive försök På grund av att mätningarna med PTHFM inte gav en lika tydlig bild av strålningabsorptionen som mätningarna med HFM så är dessa resultat placerade i Bilaga B: Temperaturmätningar med plattermoelement. En av anledningarna till att PTHFM inte gav lika tydlig bild kan vara att den metodiken och teorin som används för att beräkna den infallande strålningen ej är anpassad för den avsväljande fasen. Då PTHFM är isolerad på baksidan finns lagrad värme i utrustningen då den kyls, vilket uppstår när sprayen är aktiv och strålningen minskar. Det vill säga att när strålningen dämpas och PTHFM kyls blir resultaten otydliga. En annan anledning kan vara att den inte är lika anpassad att mäta låga strålningsnivåer i rumstemperatur som HFM är.

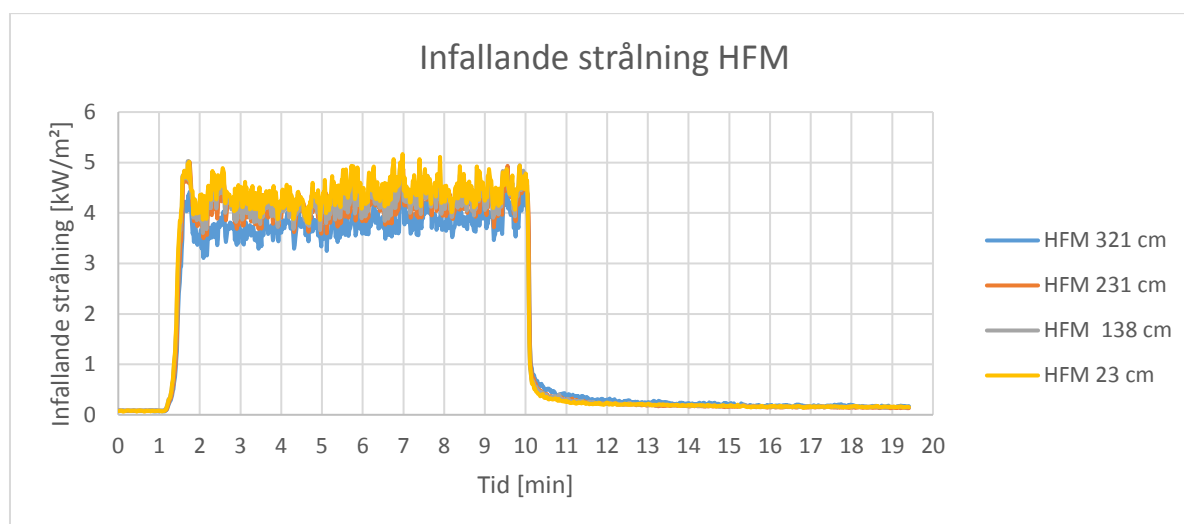
På grund av att spektrometern ej var energikalibrerad innan försöken gjordes presenteras ingen absolut storhet på den uppmätta energin utan enbart dess spektrala fördelning. I resultatet presenteras endast mätningarna från spektrometern från försök 3, 4 och 5 på grund av att de tidigare mätningarna ej var fullständiga då spektrometern ej var igång under hela förloppet.

#### 4.1. Försök 1

Försök 1 utfördes som ett referenstest utan användning av skärsläckarens vattendimma. Från Figur 24 kan det utläsas att den högsta strålningen observeras vid mätpunkten längst ner och avtar sedan med ökad höjd. Den infallande strålningen varierar över tid mellan ca 3,5-5 kW/m<sup>2</sup> för de olika mätpunkterna.

Tabell 3 – Flödesschema försök 1

Försök 1	
Tid [min]	Händelse
0	Mätning startades
1	Gasolbrännare startades
10	Gasolbrännare stängdes



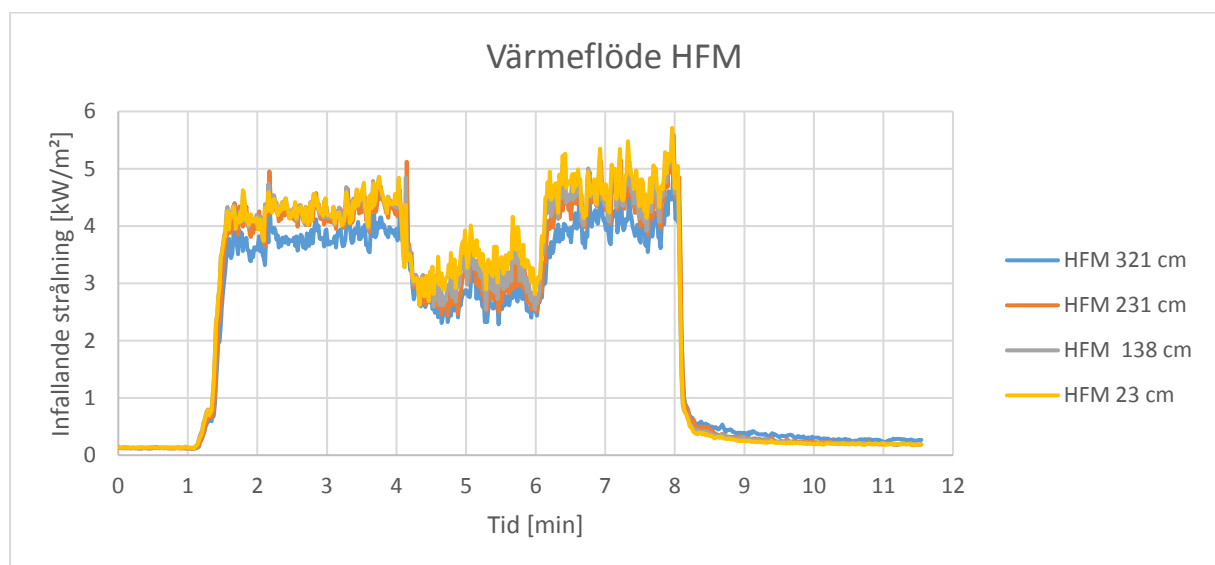
Figur 24 – Värmefflöde försök 1

## 4.2. Försök 2

I försök två användes skärsäckarens vattendimma för att dämpa värmestrålningen till mätpunkterna. I Figur 25 kan man se att vid tidpunkten då skärsläckaren startades (4 minuter) minskade värmeflödet från att tidigare pendla mellan 3,5-4,5 kW/m<sup>2</sup> till att variera mellan 2,5-3,5 kW/m<sup>2</sup> över de två minuter som den var aktiv mellan ca med undantag från två tillfälliga toppar i mätningen.

Tabell 4 – Flödesschema försök 2

Försök 2	
Tid [min]	Händelse
0	Mätning startades
1	Gasolbrännare startades
4	Skärsläckaren startades
6	Skärsläckaren stängdes av
8	Gasolbrännaren stängdes av



Figur 25 – Värmefflöde försök 2

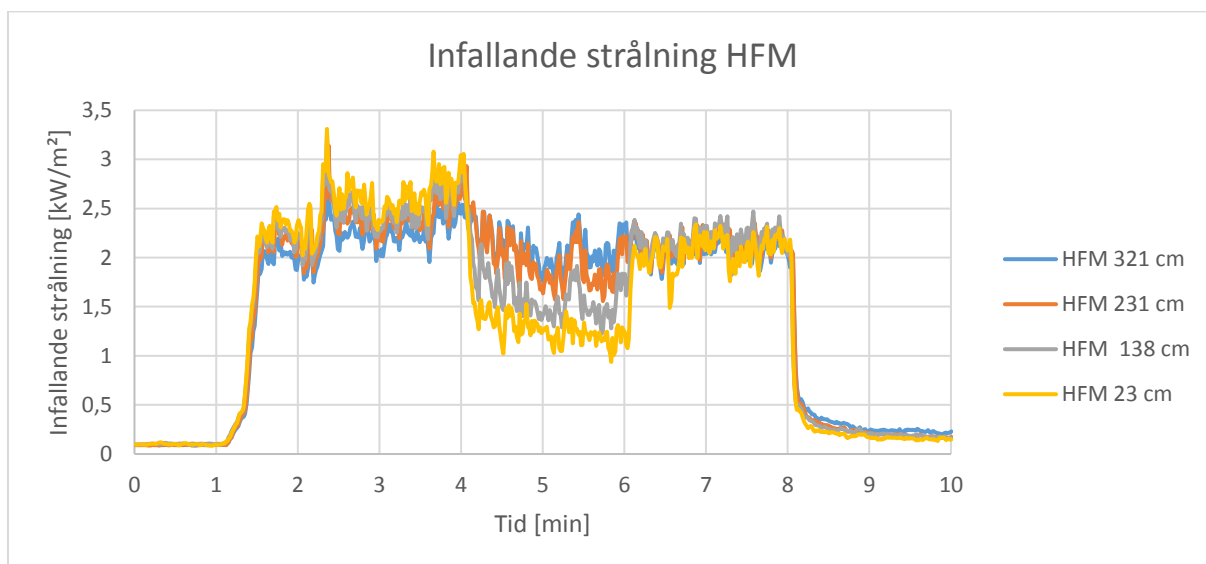
### 4.3. Försök 3

I försök 3 ökades avståndet mellan brandkällan och mätpunkterna varpå den infallande strålningen då endast gasolbrännaren är aktiv är lägre än de tidigare försöken. I Figur 26 illustreras det tydligt att dämpningen har störst effekt på mätpunkten längst ned och avtar sedan med ökad höjd. Vid den högsta mätpunkten är dämpningen av värmestrålningen endast marginell medan i den lägsta mätpunkten uppstår en dämpning på ca 50 %. Ser man istället till vad spektrometern uppmätte så dämpas strålningen till 15-25 % av den ursprungliga strålningsintensiteten.

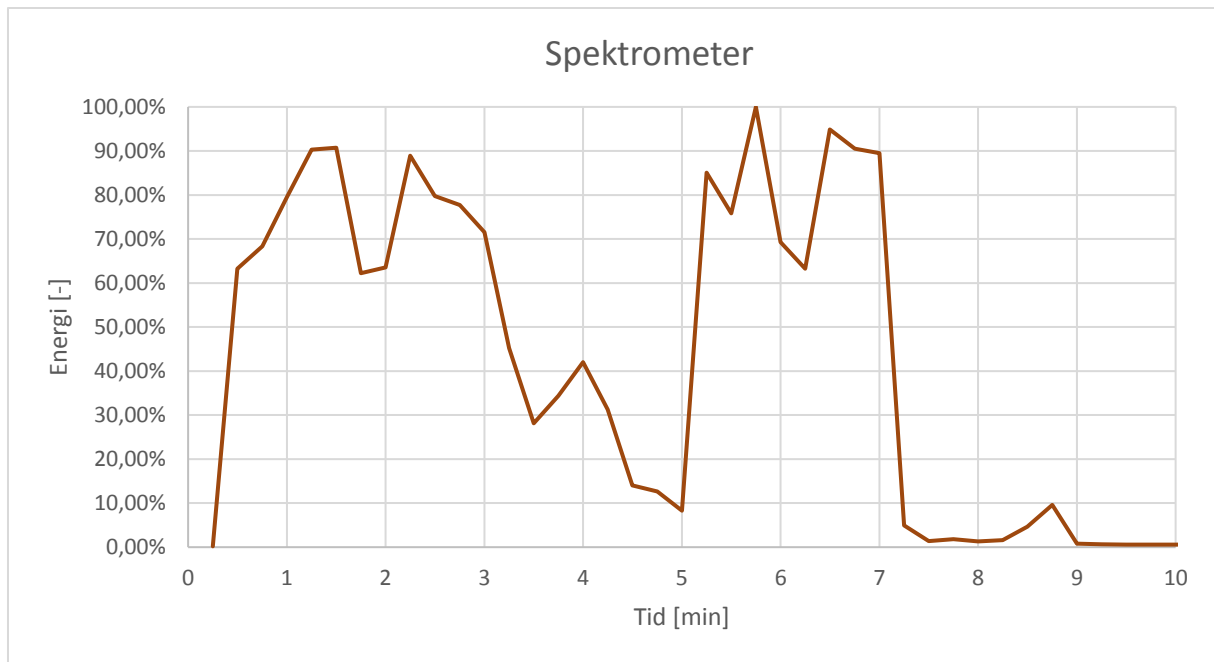
I Figur 27 illustreras den procentuella dämpningen som spektrometern uppmäter där 100 % är den högsta uppmätta strålningen under försöket.

Tabell 5 – Flödesschema försök 3

<b>Försök 3</b>	
<b>Tid [min]</b>	<b>Händelse</b>
0	Mätning startades
1	Gasolbrännare startades
4	Skärsläckaren startades
6	Skärsläckaren stängdes av
8	Gasolbrännaren stängdes av



Figur 26 – Värmefflöde försök 3



Figur 27 – Energi uppmätt av spektrometern i försök 3

Då mätningen med spektrometern ej startade samtidigt som mätningen med HFM och PTHFM är resultatet något förskjutet med ca 1 minut senare än övriga mätningar.



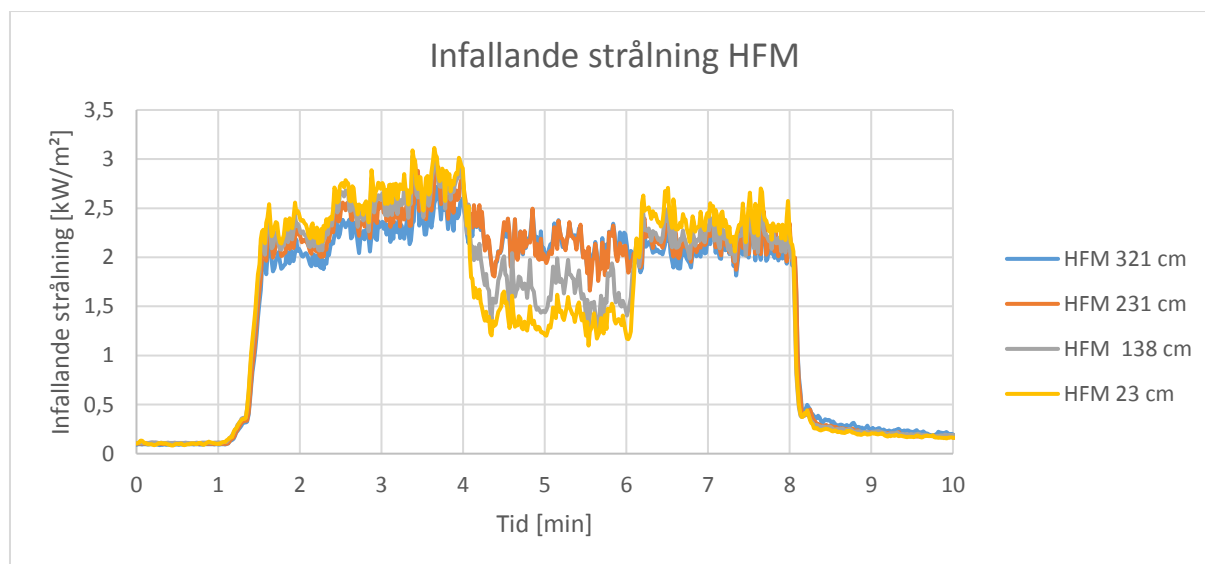
#### 4.4. Försök 4

I försök 4 flyttades riggen med skärsläckaren fram 2 meter mot vad den varit i tidigare försök. Figur 28 visar på samma fenomen som i försök 3, det vill säga att dämpningen är i storleksordningen ca 50 % för mätpunkten längst ned och att effekten av vattendimman sedan avtar med ökad höjd. Ser man istället till vad spektrometern uppmätte så dämpas strålningen till 15-25 % av den ursprungliga strålningsintensiteten.

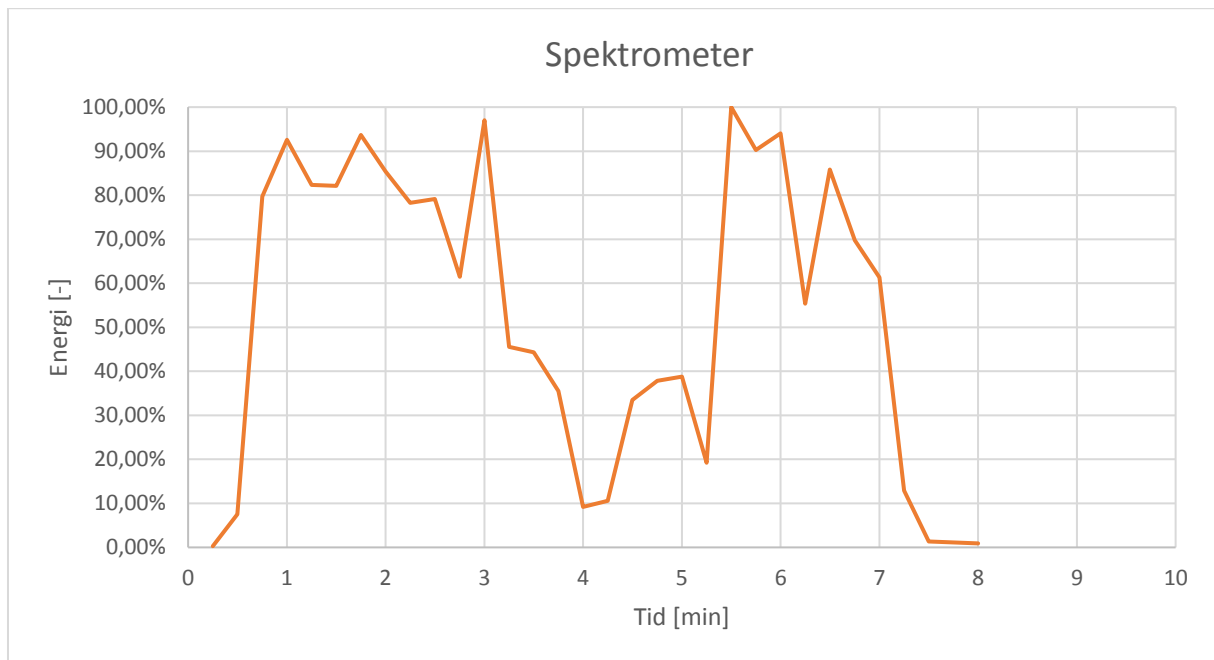
Och även på samma sätt som i försök 3 uppvisar mätningen med spektrometern samma mönster och en betydligt högre dämpning än den uppmätt med HFM. Detta visas i Figur 29.

Tabell 6 – Flödesschema försök 4

<b>Försök 4</b>	
<b>Tid [min]</b>	<b>Händelse</b>
0	Mätning startades
1	Gasolbrännare startades
4	Skärsläckaren startades
6	Skärsläckaren stängdes av
8	Gasolbrännaren stängdes av



Figur 28 – Värmefflöde försök 4



Figur 29 - Energi uppmätt av spektrometern i försök 4

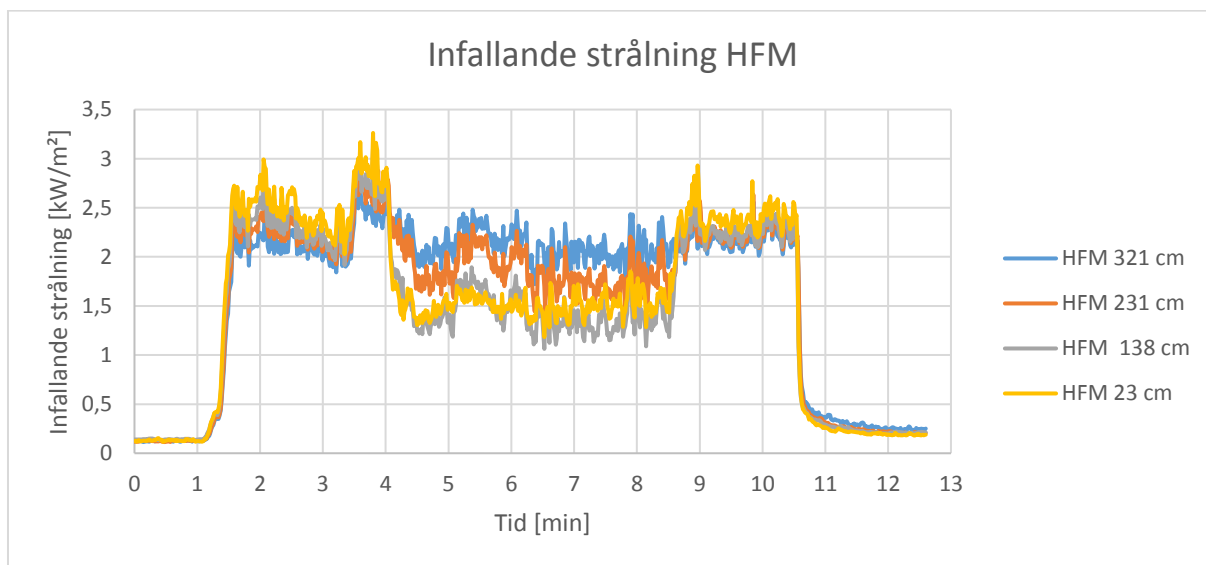
Då mätningen med spektrometern ej startade samtidigt som mätningen med HFM och PTHFM är resultatet något förskjutet med ca 1 minut senare än övriga mätningar.

#### 4.5. Försök 5

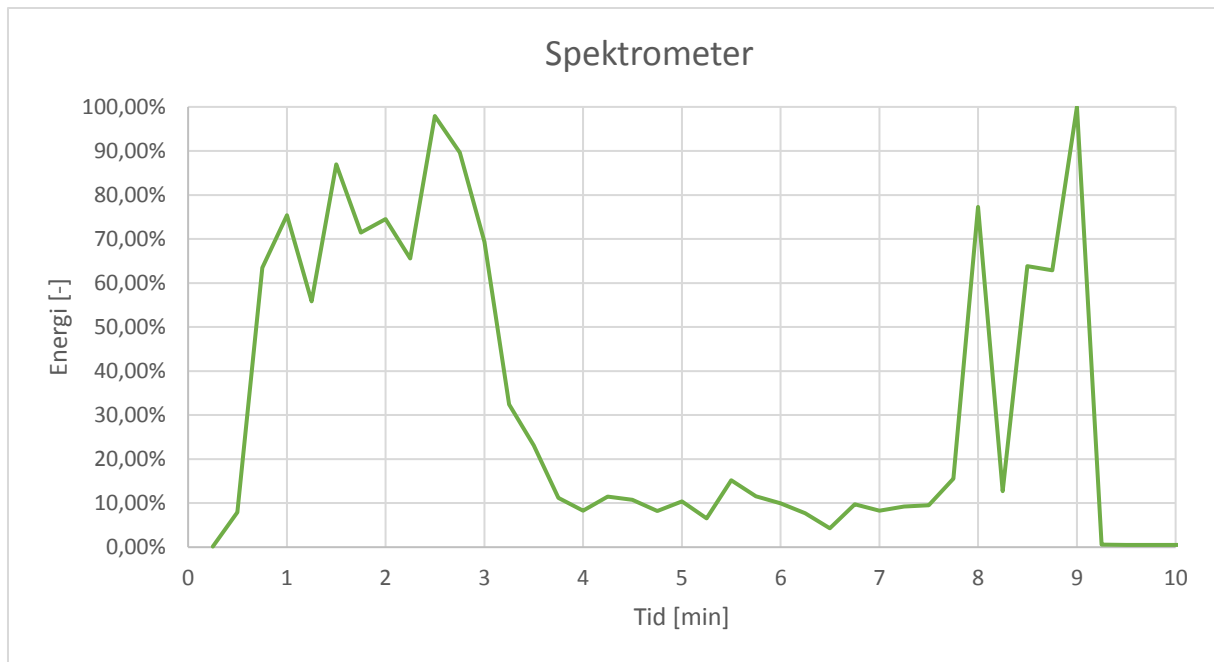
I försök 5 är det svårt att urskilja någon större effekt som inblandningen av tillsatsmedel har haft på dämpningen av den infallande strålningen, dämpningen är i storleksordningen lika stor som de tidigare försöken, detta visas i Figur 30. Den uppmätta dämpningen är däremot betydligt större i mätningen med spektrometern, detta visas i Figur 31. Den uppmätte i detta försök att strålningen dämpas till 10-15 % av den ursprungliga strålningsintensiteten.

Tabell 7 – Flödesschema försök 5

<b>Försök 5</b>	
<b>Tid [min]</b>	<b>Händelse</b>
0	Mätning startades
1	Gasolbrännare startades
4	Skärsläckaren startades
6	Inblandning av tillsatsmedel i sprayen
7,5	Avbryter inblandning av tillsatsmedel i sprayen
8,5	Skärsläckren stängdes av
10,5	Gasolbrännaren stängdes av



Figur 30 – Värmefflöde försök 5



*Figur 31 - Energi uppmätt av spektrometern*

Då mätningen med spektrometern ej startade samtidigt som mätningen med HFM och PTHFM är resultatet något förskjutet med ca 1 minut senare än övriga mätningar.

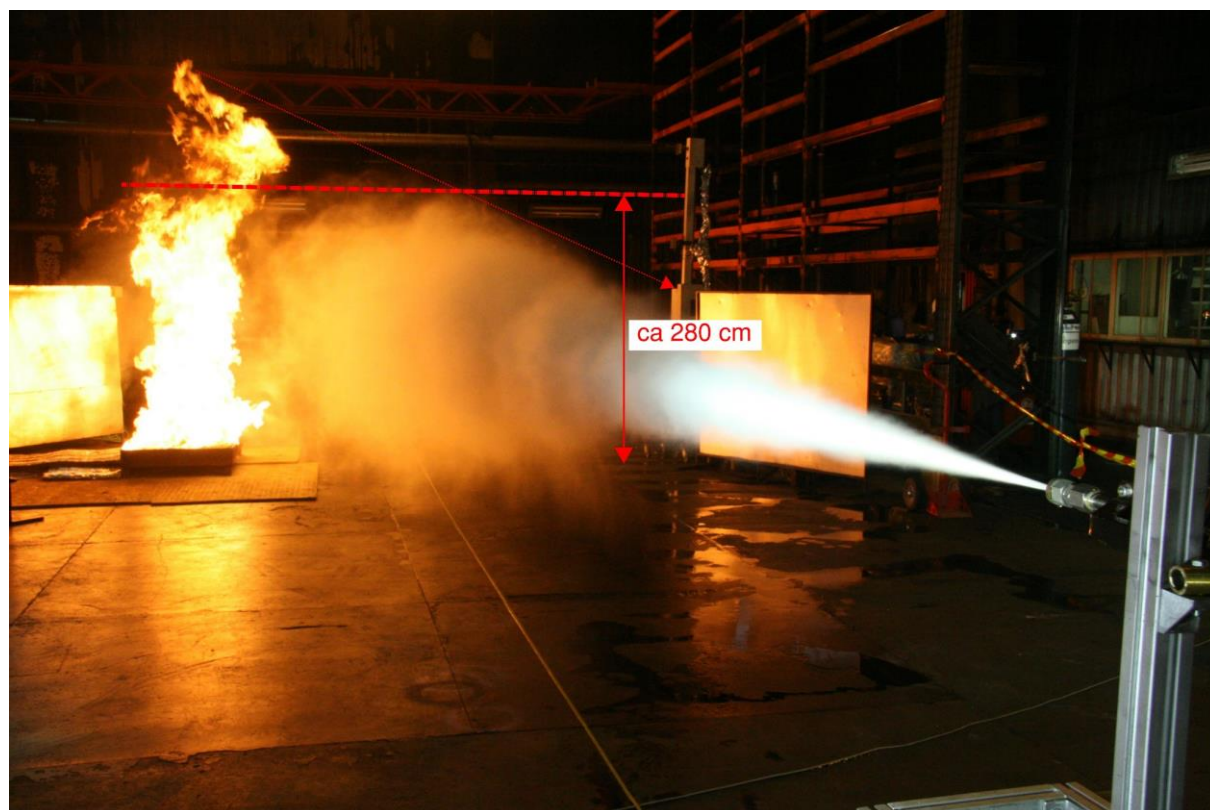
#### 4.6. Uppskattning av flamhöjd kontra täckt yta av spray

Flamhöjden uppskattas då det är intressant att se ungefär hur mycket av den totala flambilden som täcks av skärsläckarens vattendimma.

Med hjälp av (13) kan brandkällans flamhöjd uppskattas. Under försöken användes en rektangulär brandkälla med arean  $1,26 \text{ m}^2$ . En omvandling till en cirkulär diameter ger  $D=1,27 \text{ m}$  och effekten är  $3 \text{ MW}$ , flammans medelhöjd blir då som följer:

$$L = 0,235 * 3000^{\frac{2}{5}} - 1,02 * 1,27 \approx 4,5 \text{ m} \quad (19)$$

En rent visuell bedömning av hur stor del av flammen som täcktes av sprayen ses i Figur 32.



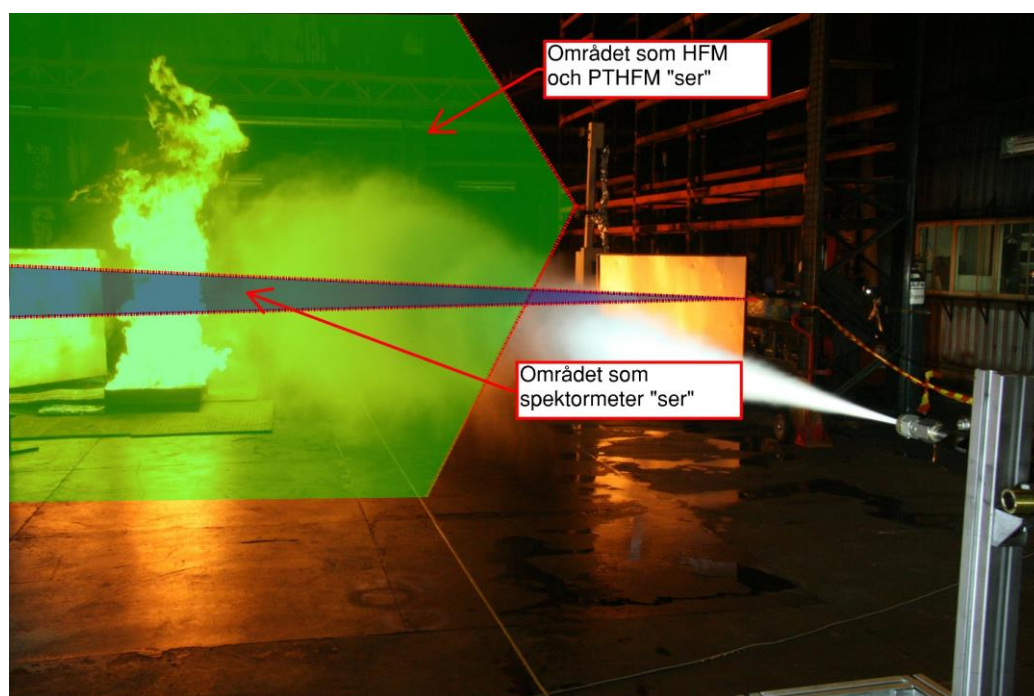
Figur 32 – Yta som täcks av sprayen (Foto: Ulf Wickström)

## 5. Diskussion

Baserat på resultatet syns en tydlig förändring på den infallande strålningen när skärsläckaren är aktiv.

En intressant observation är att om en jämförelse görs mellan dämpningen i infallande strålning mellan mätningarna som är gjorda med PTHFM (se Bilaga B), HFM och spektrometer är det en märkbar skillnad. Mätningarna gjorda med spektrometer talar för en betydlig större dämpning än vad mätningarna med HFM gör. Detta beror med största sannolikhet på att spektrometern har en betydligt mindre rymdvinkel när den mäter än vad HFM och PTHFM har [18]. Vinkelfaktorn för vad spektrometern ser av branden är lika med 1 eftersom den inte ”ser” något mer av omgivningen. I och med det så ”ser” spektrometern enbart flammen när skärsläckaren inte är aktiv och på samma sätt täcker vattendimman hela den del av flammen som finns i spektrometers synfält när skärsläckaren är aktiv.

På motsatt sätt så ”ser” HFM betydligt mycket mer av branden och får t.ex även bidrag från flammen som inte täcks av vattendimman. Trots att skärsläckaren är aktiv. Därför blir skillnaden i infallande strålning relativt stor för spektrometers mätningar före och efter att skärsläckaren används. En illustration av vad som menas med att mätutrustningen ”ser” någonting visas i Figur 33.

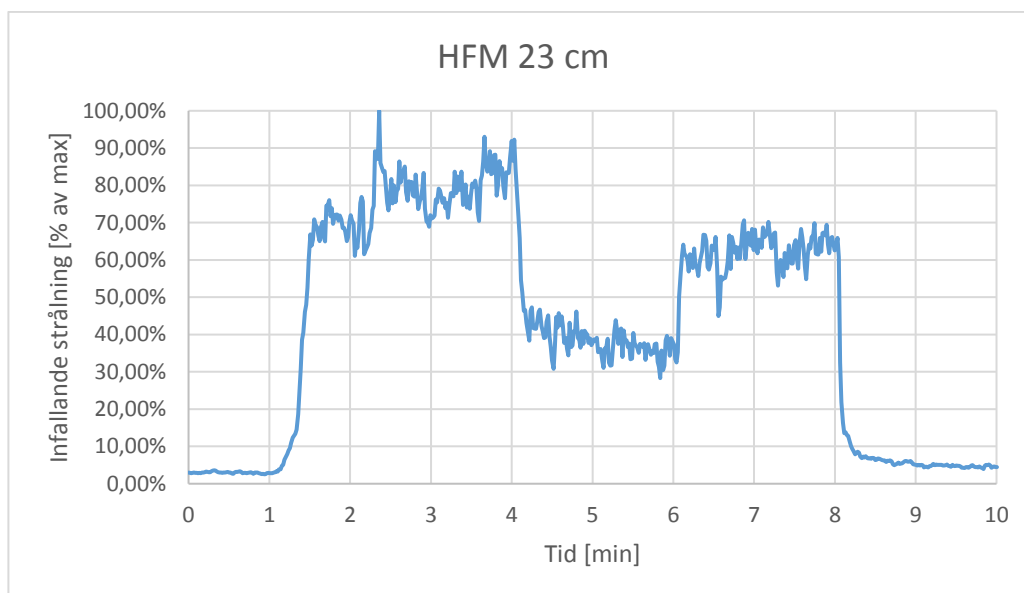


Figur 33 – Illustration av mätutrustningens rymdvinklar vid mätning

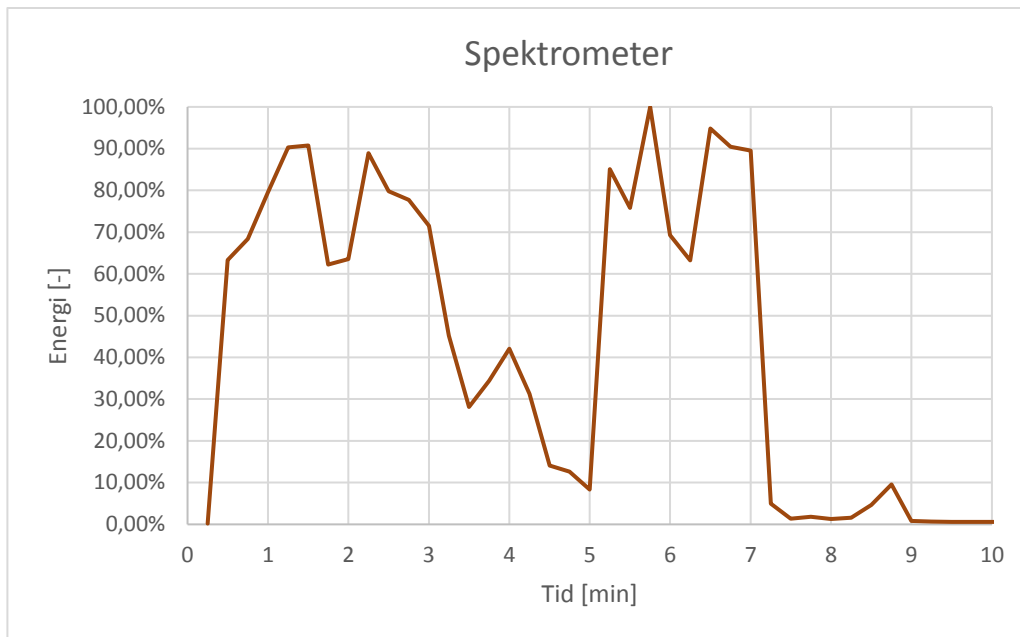
Detta fenomen gör att man kan beskriva mätningen som är gjord med spektrometern som den mest vetenskapliga korrekta karakteriseringen av dämpningen hos själva vattendimman.

Medan dämpningen som uppstår när man mäter med PTHFM och HFM är mer användbara i ett realistiskt sammanhang vid en skarp insats med skärsläckaren då man inte kan anta att vattendimman kommer kunna täcka in en hel flamma om man har en större brand.

Eftersom tiden då mätningarna startade ej är detsamma för mätningen med spektrometer och HFM visas de i separata figurer men som tydligt illustrerar att spektrometern uppmäter en betydligt högre dämpning. Figurerna nedan är från försök 3.



*Figur 27– Resultat från försök 3, för den lägst placerade HFM (uppmätte mest dämpning) presenterat som % av max infallande strålning*



Figur 34 – Uppmätt energi av spektrometern från försök 3

För att få en så bra representation för hur mycket sprayen kan dämpa så är det viktigt att sprayen inte påverkar mätutrustningen på något sätt, det vill säga att mätutrustningen ej får påverkas av själva vattnet och bli blöt då detta skulle inverka på resultatet. Samtidigt är det önskvärt att strålningen är så hög som möjligt för att få så högt signal/brus-förhållande som möjligt. Dessa två kriterier skapar ett problem då vi vill ha brandkällan så nära mätutrustningen som möjligt men samtidigt inte riskera att vattensprayen ska träffa mätutrustningen. Om brandkällan placeras för långt bort från mätpunkterna kommer den infallande strålningen minska men det betyder även att vi kan flytta sprayen längre bort från mätutrustningen så att de inte riskerar att bli träffade av vattensprayen. Omvänt blir det att om vi placerar brandkällan närmre mätpunkterna får vi en högre infallande strålning men då riskerar vi att påverka mätutrustningen med vattensprayen. Därför var det viktigt att försöka hitta ett mellanläge där vi fick tillräckligt hög infallande strålning men samtidigt kunde säkerställa att mätutrustningen inte träffades av vattensprayen.

Förtester gjordes för att rent visuellt göra en bedömning om mätutrustningen träffades av vattensprayen. Dock kvarstår risken att mätutrustningen kan ha träffats av vattensprayen och därmed blivit kylda och påverkat resultatet på ett sådant sätt att mätningen visar för låg infallande strålning. Då bedömningen endast gjordes visuellt kan vi inte försäkra oss om att detta har inträffat men bedömningen gjordes att avståndet var tillräckligt mellan vattensprayen och mätpunkterna.



Med samma resonemang som ovan finns även risken att vi har påverkat strålningskällan eftersom vi skapat ett luftflöde som förändrar flambilden när sprayen passerar flamman. Detta kan visas enligt Figur 35.



*Figur 35 – Flambild när skärsläckaren är aktiv (sprayen rör sig från vänster till höger i bild) till vänster jämfört med ej aktiv till höger (Foto: Ulf Wickström)*

Det syns tydligt hur flamman förflyttar sig till höger i bild (sprayens flödesriktning). Detta var framförallt problem i test 2. Efter det gjordes avståndet mellan flamman och mätutrustningen större vilket gjorde att påverkan minskade. Men eftersom vi skapar ett luftflöde i rummet kommer det finnas en viss påverkan, vilket gör att ett visst mätfel kan ha uppstått på grund av olika flambilder före och efter sprayen.

Eventuellt fortsatt arbete inom detta område vore att undersöka vilket typ av rörelsemönster som är mest effektivt. Med det menas att det eventuellt kan vara mer effektivt att med en rörelse upp och ned med skärsläckaren kan ge en bättre spraybild som kan påverka absorptionen ännu mer då spraybilden skulle öka till storleken.

Det kan även vara intressant att undersöka vilken typ av strålning den är mest effektiv mot. Olika material strålar olika mycket och inom olika våglängder. Eventuella nya områden att använda skärsläckaren på skulle kunna upptäckas om det visar sig att den är speciellt effektiv för vissa typer av bränder.

## 6. Slutsats

Att vattensprayen från skärsläckaren coldcut™ cobra har en dämpande förmåga mot infallande strålning visas tydligt i resultatet. Man kan dela upp resultatet i två delar, ett vetenskapligt korrekt resultat och ett mer realistiskt resultat. För operativ användning av skärsläckaren hos en räddningstjänst är nog det realistiska resultatet (mätningarna gjorda med HFM) mest användbart. Detta på grund av att vid en insats kommer inte vattendimman kunna skärma av hela flamman.

Den ungefärliga strålningsnivån för mätningarna gjorda med HFM (brett synfält) är ca 50 % av ursprunglig strålningsnivå, beroende på vilken höjd mätningen utförs på medan mätningarna med spektrometern (smalt synfält) är ca 15-25 % av ursprunglig strålning.

Den faktiska förmågan som vattendimman har att dämpa den infallande strålningen är bäst representerad av mätningarna gjorda av spektrometern men resultaten därifrån är förmodligen inte speciellt användbara i praktiska syften som vid en skarp insats med skärsläckaren. Detta på grund av att spektrometern rymdvinkel är så pass liten att den inte får något inslag från övriga miljön, utan endast från flamman och vattendimman.

### 6.1. Förslag på framtida studier

Det är viktigt att betona att resultaten från dessa försök är tillämpbara för just denna brand.

För att få ut en optimal användning av verktyget bör vidare undersökningar göras av hur olika rörelsemönster påverkar dämpningen, samt vid vilka specifika situationer det lämpar sig bäst att använda dessa rörelsemönster.

Vidare hade det varit intressant att utföra samma test men att variera brandkällan till olika effekter och olika bränslen för att undersöka om vattendimman har en bättre respektive sämre effekt beroende på vilket bränsle det är.

## 7. Referenser

- [1] M. Lindgren, "Kartläggning av tillsatsmedel vid släckinsats med skärsläckaren Cobra," 2016.
- [2] "Pyrolance," 24 02 2018. [Online]. Available: [http://pyrolance.com/?page\\_id=551](http://pyrolance.com/?page_id=551).
- [3] D. Martin, "The use of a water mist curtain as a radiation shield," Department of fire safety engineering, Lund University, 2015.
- [4] M. Först, R. Ochoterena och J. Lindström, "Spray characterization of the cutting extinguisher," 2012.
- [5] M. Försth och K. Möller, "Absorption of heat radiation in liquid droplets," 2011.
- [6] J. Biörsmark, Interviewee, *Skärsläckarens historia*. [Intervju]. 08 03 2017.
- [7] B. Andersson, "Skärsläckarkonceptets operativa användande," MSB, 2009.
- [8] U. Wickström, D. Duthinh och K. McGrattan, "Adiabatic Surface Temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures," i *International Interflam Conference*, London, 2007.
- [9] U. Wickström, *Temperature calculation in fire safety engineering*, Springer, 2016.
- [10] B. Karlsson och J. G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press LCC, 1999.
- [11] M. Massoud, *Engineering thermofluids*, Berlin: Springer, 2005.
- [12] U. Wickström, "Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for calculating heat transfer and controlling fire resistance furnaces," *Fire safety science* 9, pp. 1227-1238, 2008.
- [13] A. Häggkvist, J. Sjöström och U. Wickström, "Using plate thermometer measurements to calculate incident heat radiation," *Journal of fire sciences*, 2012.
- [14] J. Sjöström och U. Wickström, "Different types of plate thermometers for measuring Incident radiation heat flux," i *13 th international conference and exhibition of fire science and engineering, Interflam*, Royal Holloway Collage, 2013.
- [15] C. Gustavsson, "The Plate thermometer heat flux meter - an Accuracy and Calibration Study," 2017.
- [16] P. R. Griffiths, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, second edition, Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [17] "Vertex 70/70v FTIR specrometer," Bruker, 24 02 2018. [Online]. Available: <https://www.bruker.com/products/infrared-near-infrared-and-raman-spectroscopy/ft-ir-research-spectrometers/vertex-series/vertex-7070v/overview.html>.
- [18] M. Försth, Interviewee, *Diskussion angående resultatet*. [Intervju]. 08 11 2017.

## 8. Bilagor

### 8.1. Bilaga A: Beräkning av konvektiva värmeövergångskoefficienten

Följande beräkningar är en del för att beräkna den infallande strålningen mot PTHFM. Generellt sett är det väldigt svårt att uppskatta den konvektiva värmeövergångskoefficienten. Med hjälp av empiriska försök kan en kvalitativ bedömning av  $h_c$  göras enligt (20).

$$\overline{Nu_f} = \frac{\overline{h_f} \cdot L}{k_f} = C \cdot (Gr_f \cdot Pr_f)^m \quad (20)$$

Från (20) kan värmeövergångskoefficienten härledas enligt (21).

$$\overline{h_f} = \frac{C \cdot (Gr_f \cdot Pr_f)^m \cdot k_f}{L} \quad (21)$$

Där  $Gr_f \cdot Pr_f$ ,  $k_f$  beräknas enligt följande.

$$Gr_f \cdot Pr_f = \frac{g \cdot (T_s - T_g) \cdot L^3}{T_f \cdot (1,10 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^{1,68})^2} \quad (22)$$

$$k_f = 291 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^{0,79} \quad (23)$$

Beroende på om flödet är laminärt eller turbulent antar konstanterna C och m olika värden enligt Tabell 8.

Tabell 8 – konstanter beroende på flöde

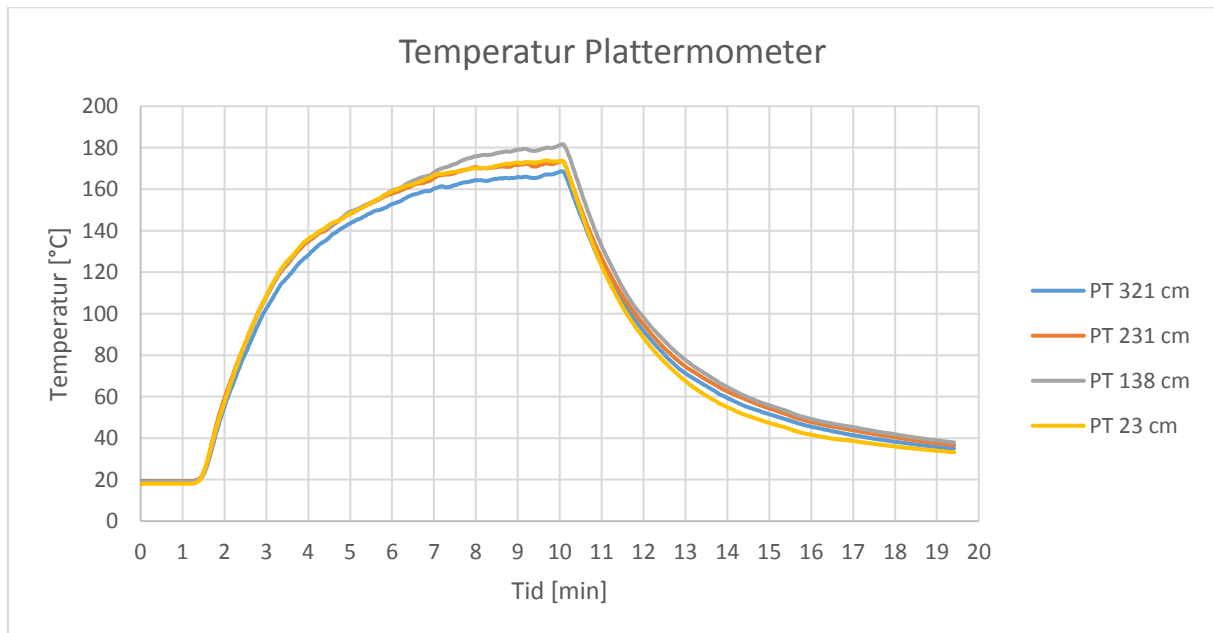
<b>Vertikal yta</b>	$Gr_f \cdot Pr_f$	Karakteristisk längd	C	m
Laminärt flöde	$10^4$ - $10^9$	L	0,59	1/4
Turbulent flöde	$10^9$ - $12^{12}$	L	0,13	1/3
<b>Horisontell yta</b>				
Laminärt flöde (värmeutsatt yta uppåt)	$2 \cdot 10^4$ - $8 \cdot 10^6$	A/P	0,54	1/4
Turbulent	$8 \cdot 10^6$ - $10^{11}$	A/P	0,14	1/3
Laminärt (Värmeutsatt yta ner)	$10^5$ - $10^{11}$	A/P	0,27	1/4

$Pr_f$  kan antas vara 0,7 för luft då det inte förändras väsentligt vid temperaturökningar (Wickström 2016) .

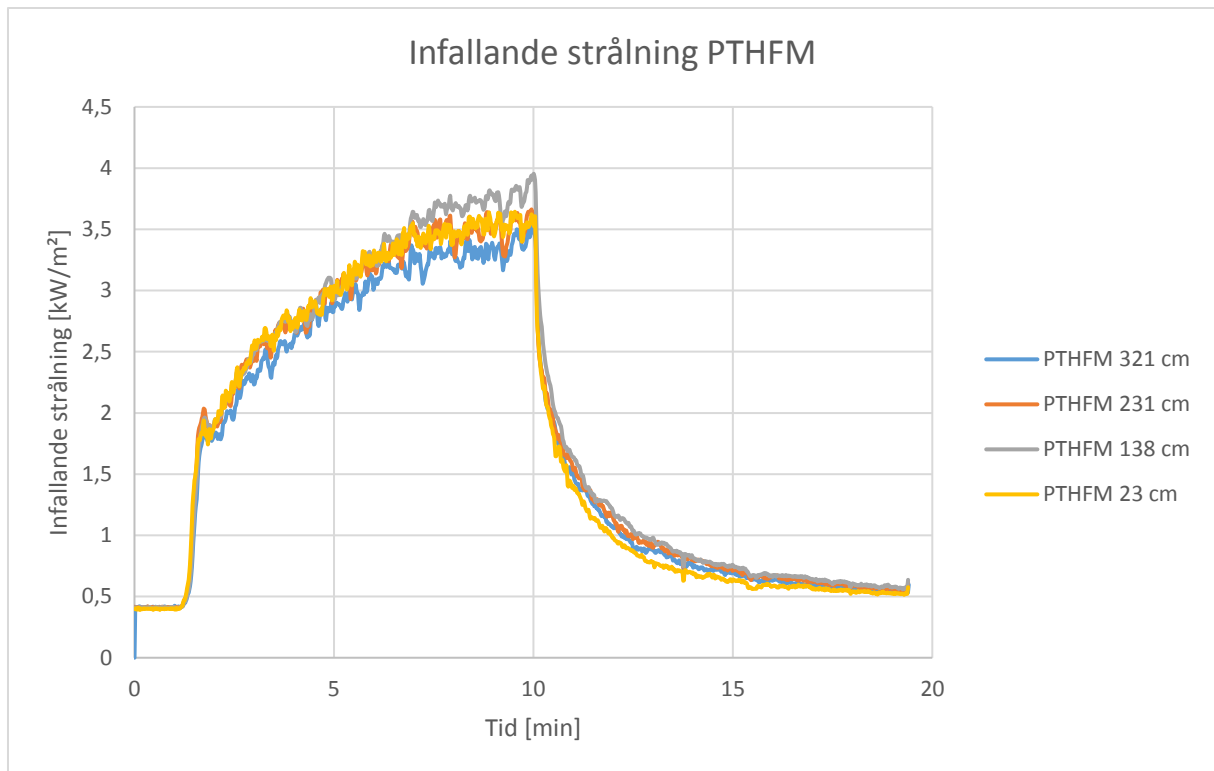
## 8.2. Bilaga B: Temperaturmätningar med plattermoelement

Med hjälp av ekvation (15) och (21) tillsammans med uppmätta temperaturer kan den infallande strålningen mot plattermoelementen beräknas.  $C$  antas vara  $4200 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K})$   $K$  antas vara  $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  [15].

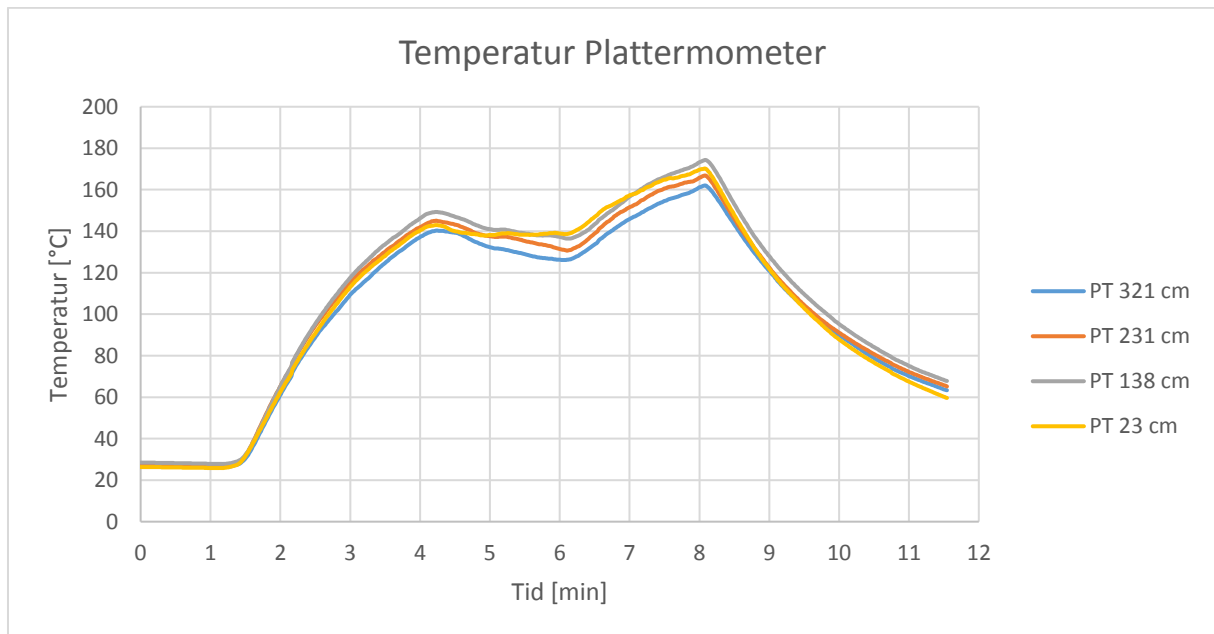
Anledningen till att figurerna nedan visar en sakta ökning av den infallande strålningen är förmodligen att PTHFM ej är anpassad att mäta så pass låga strålningsnivåer.



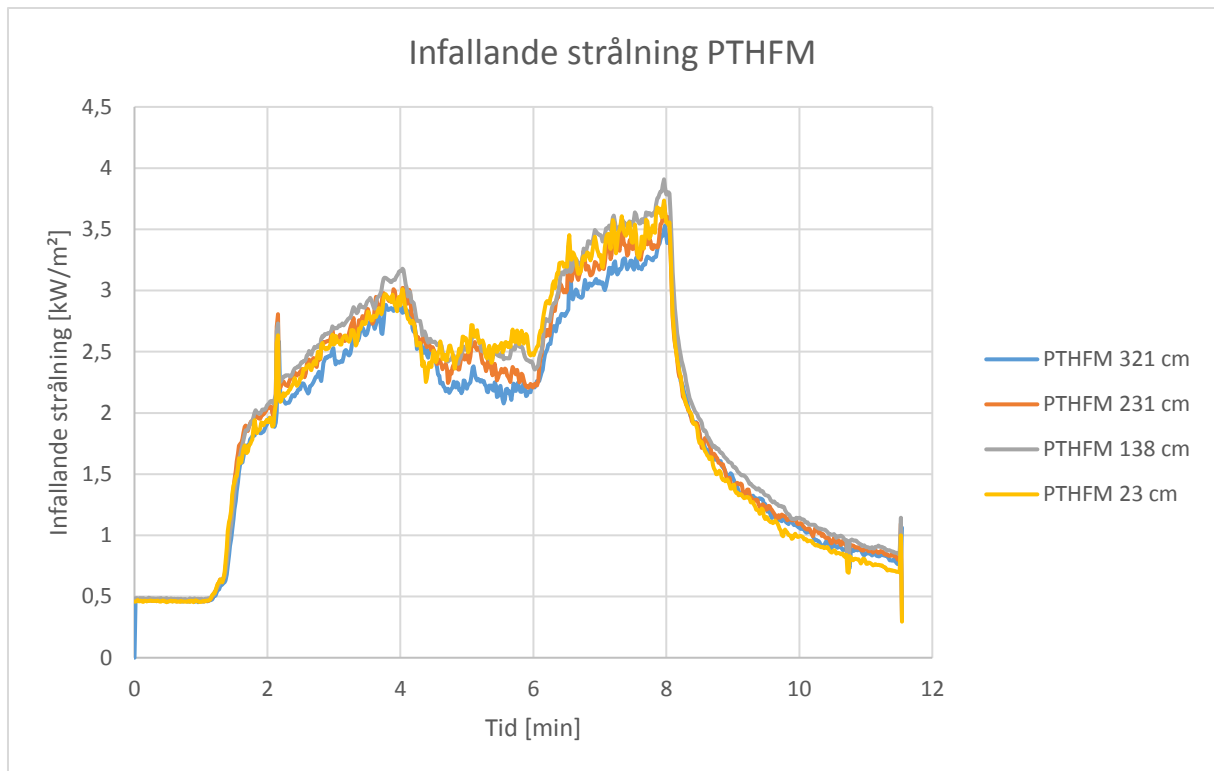
Figur 36 – Temperaturmätning test 1



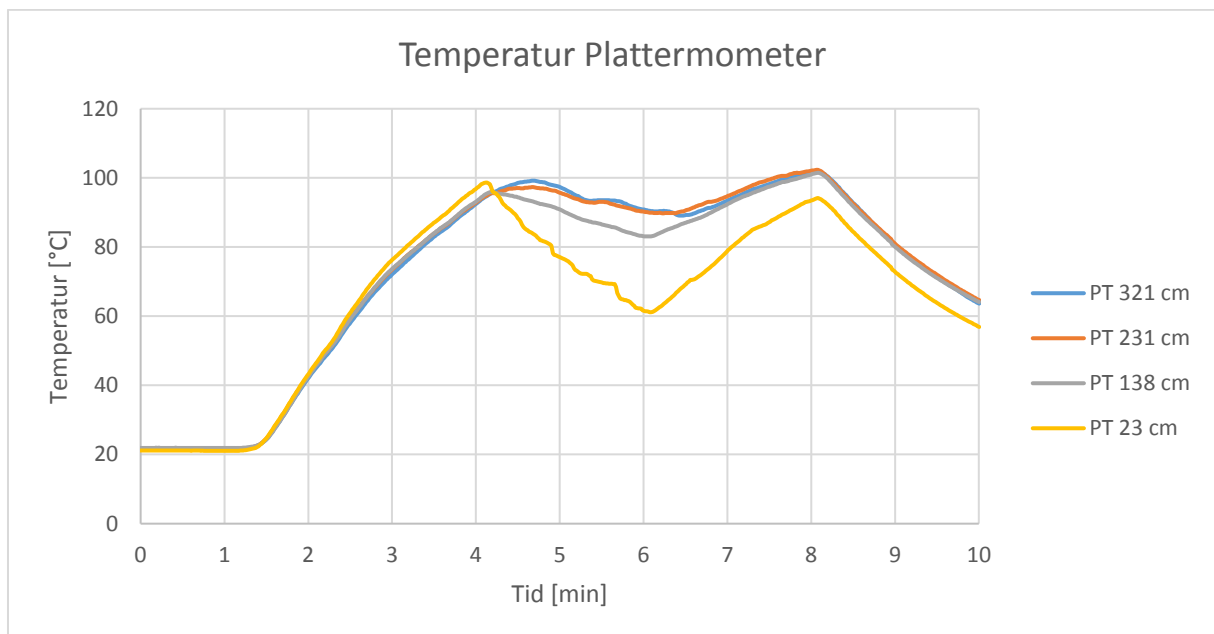
Figur 37 – Infallande strålning PTHFM försök 1



Figur 38 – Temperaturmätning test 2

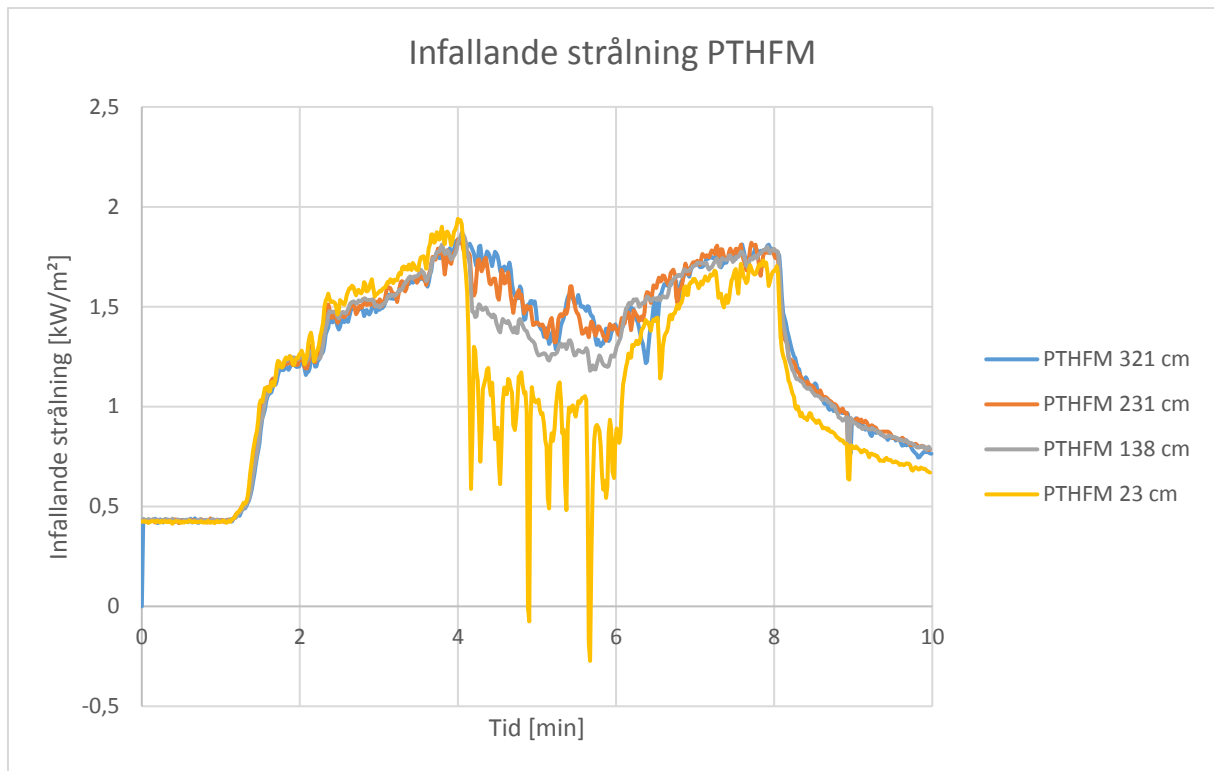


Figur 39 – Infallande strålning PTHFM försök 2

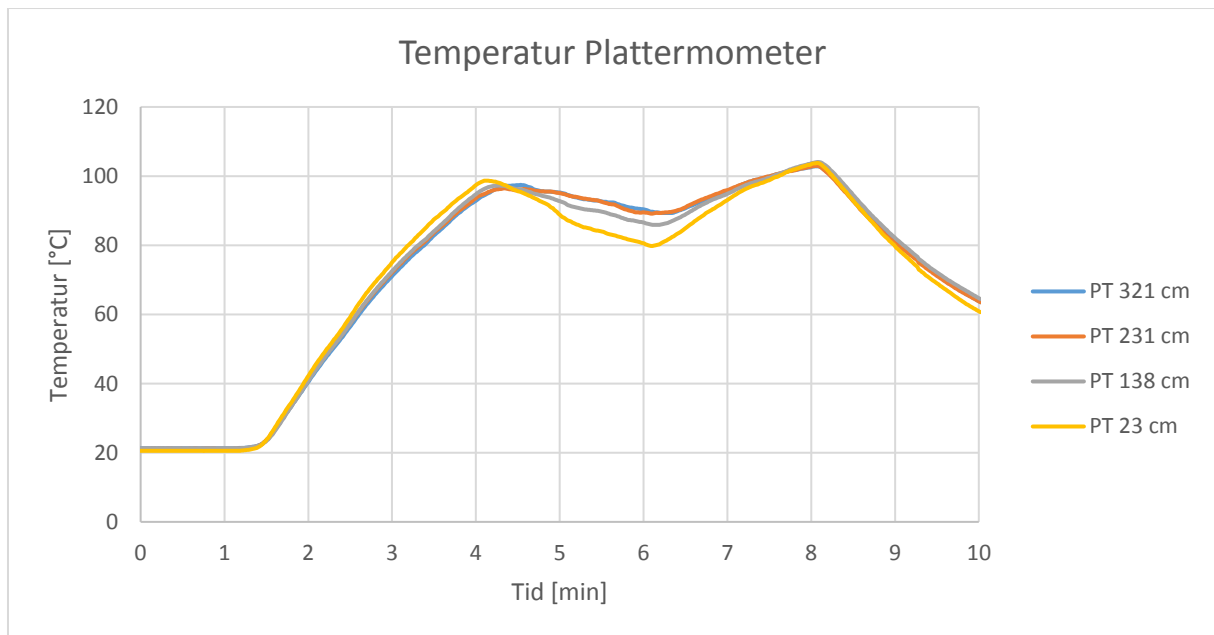


Figur 40 – Temperaturmätning test 3

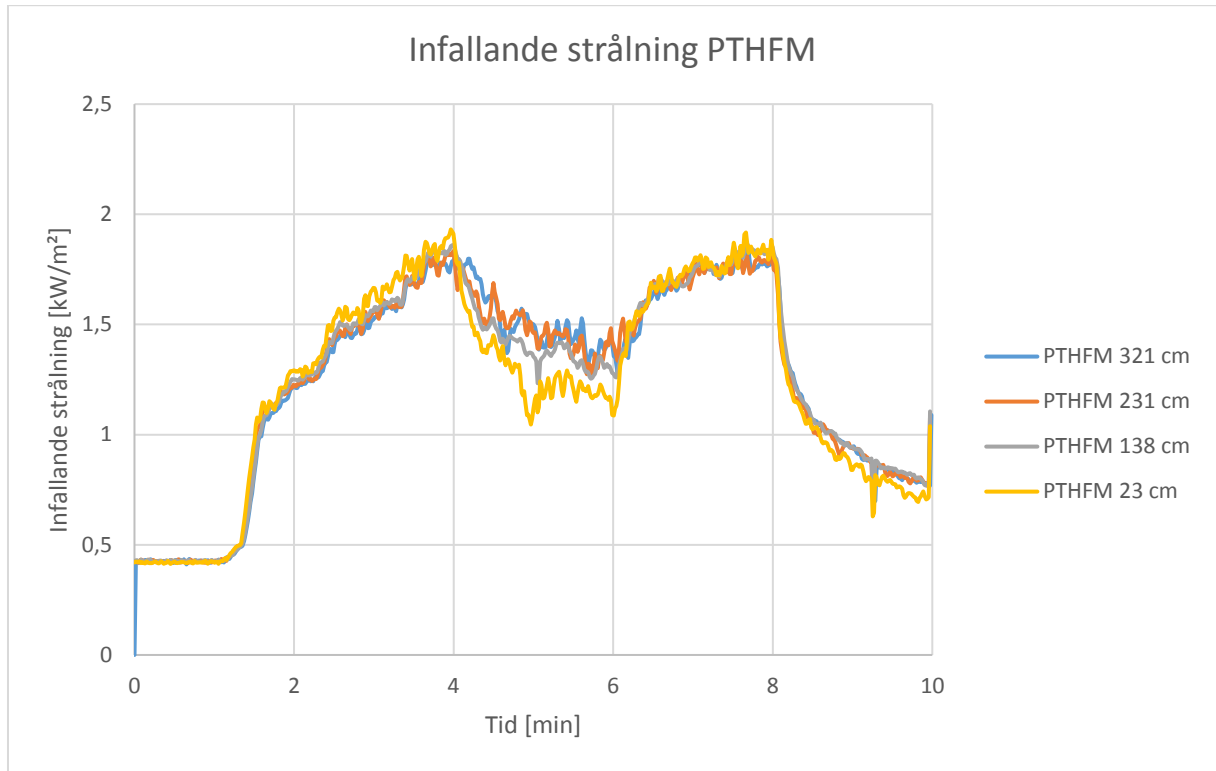




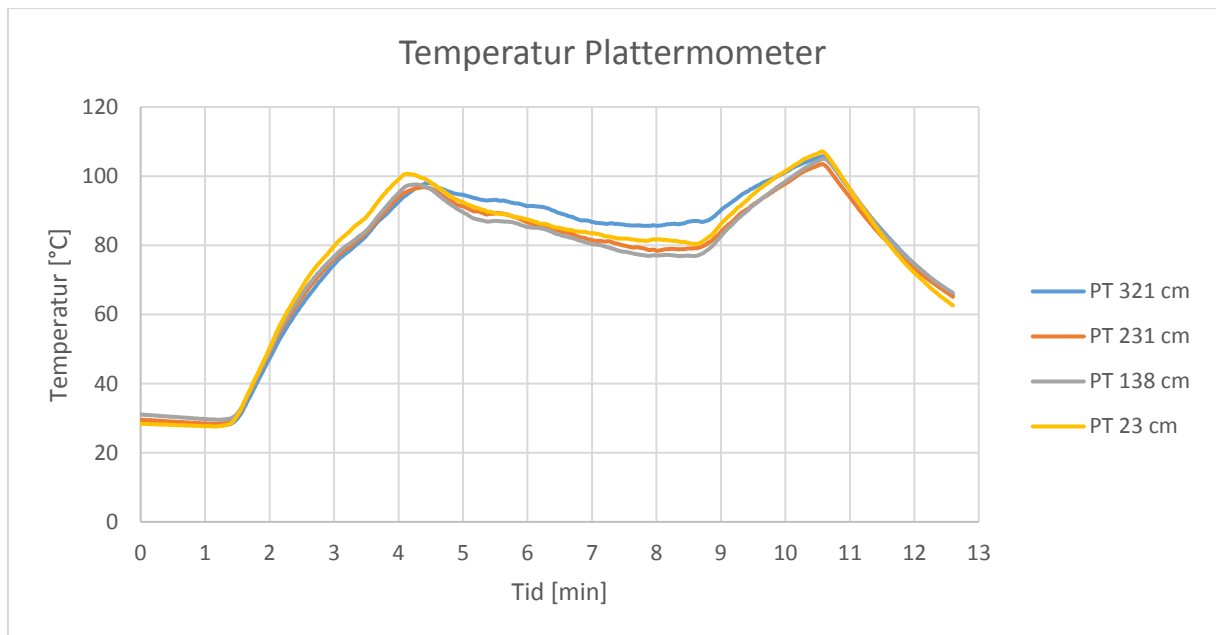
Figur 41 - Infallande strålning PTHFM försök 3



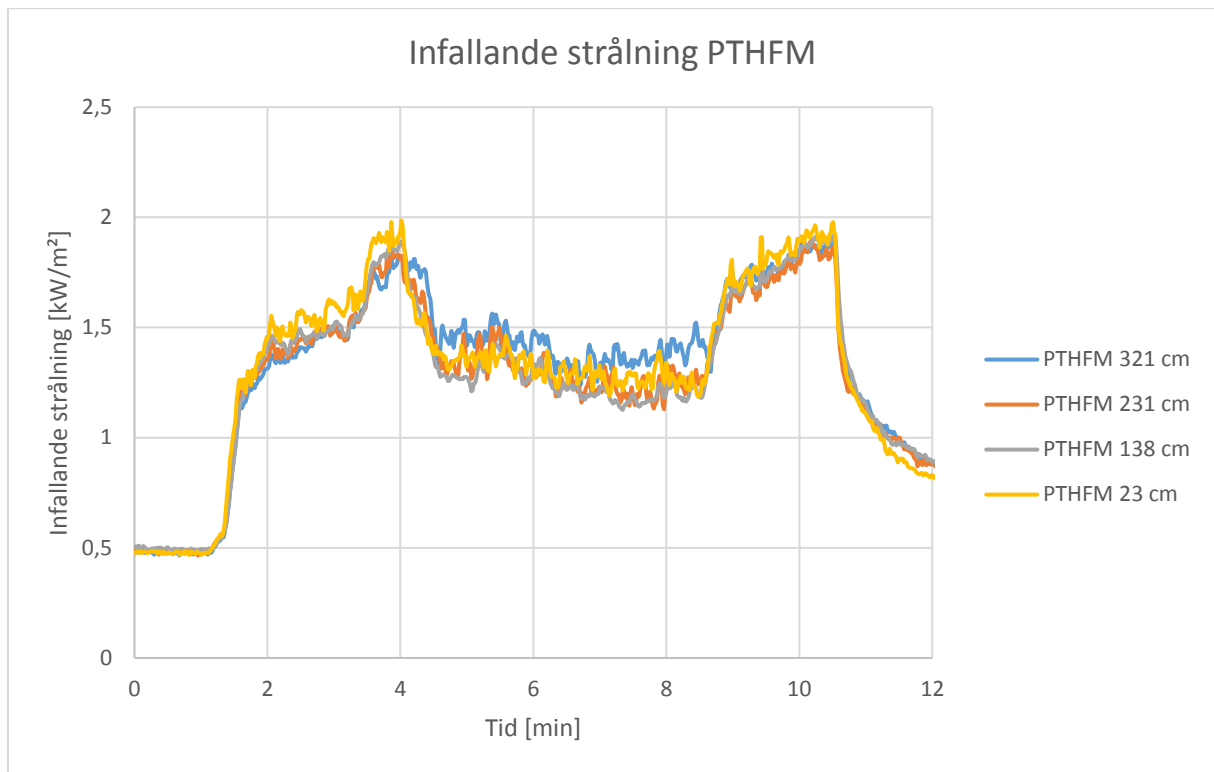
Figur 42 – Temperaturmätning test 4



Figur 43 - Infallande strålning PTHFM försök 4

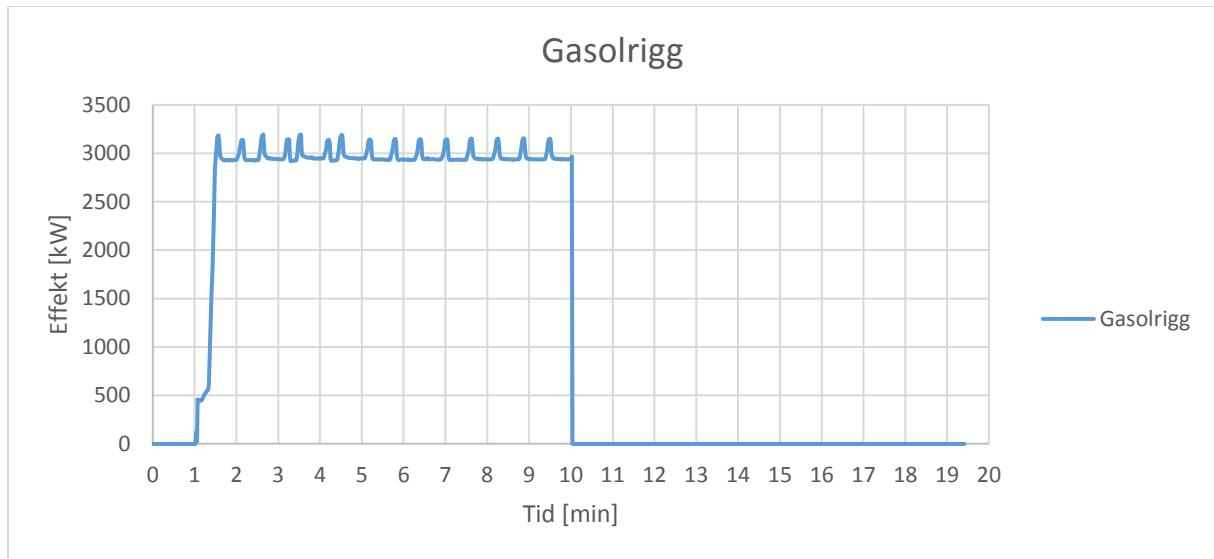


Figur 44 – Temperaturmätning test 5

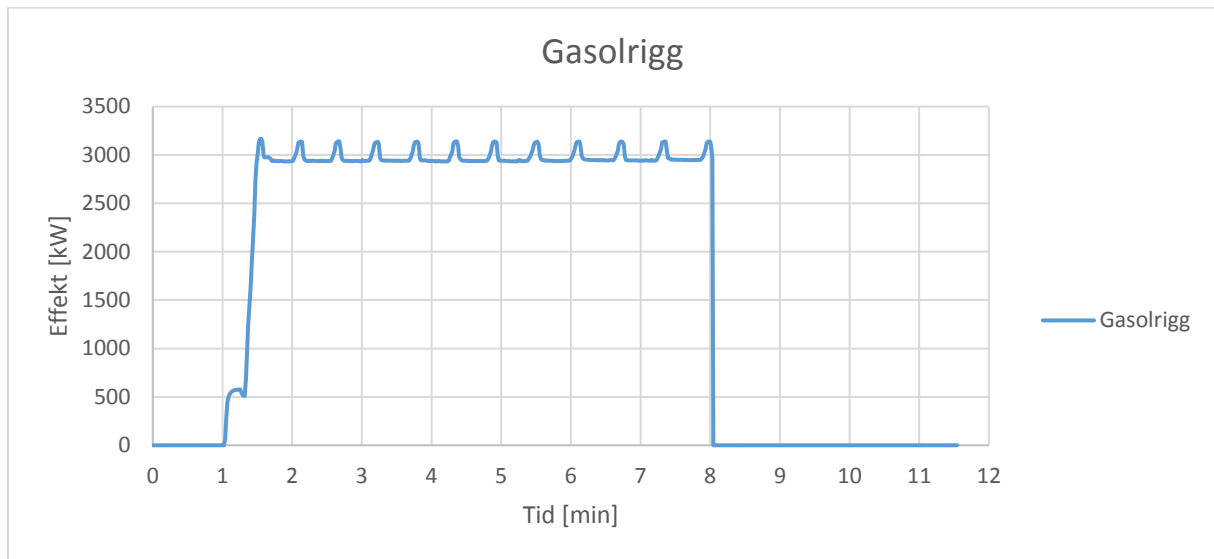


Figur 45 - Infallande strålning PTHFM försök 5

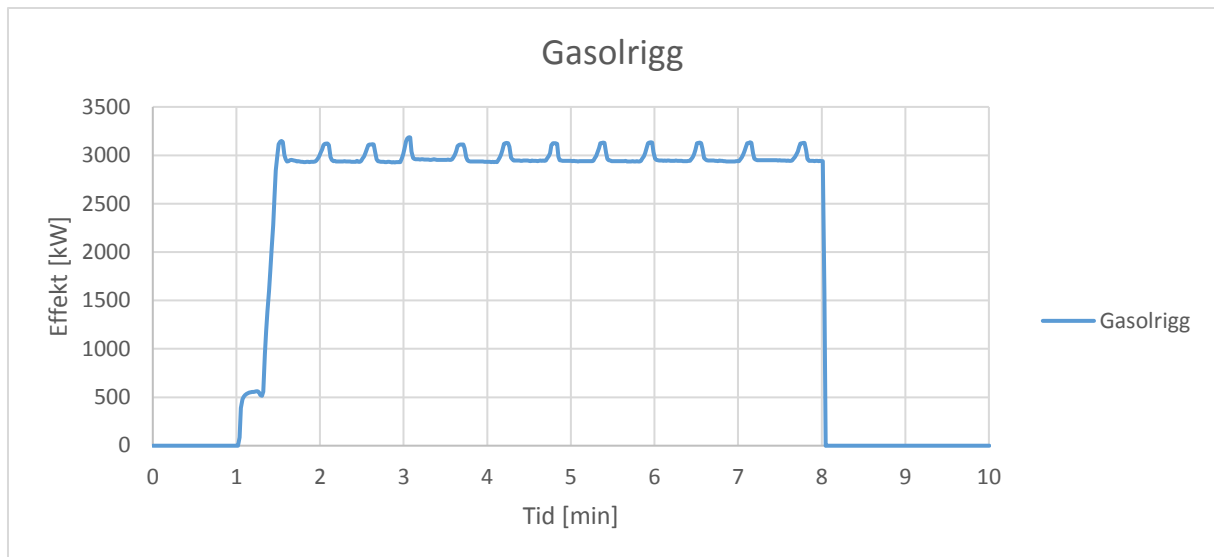
### 8.3. Bilaga C: Uppmätt effekt hos gasolbrännaren



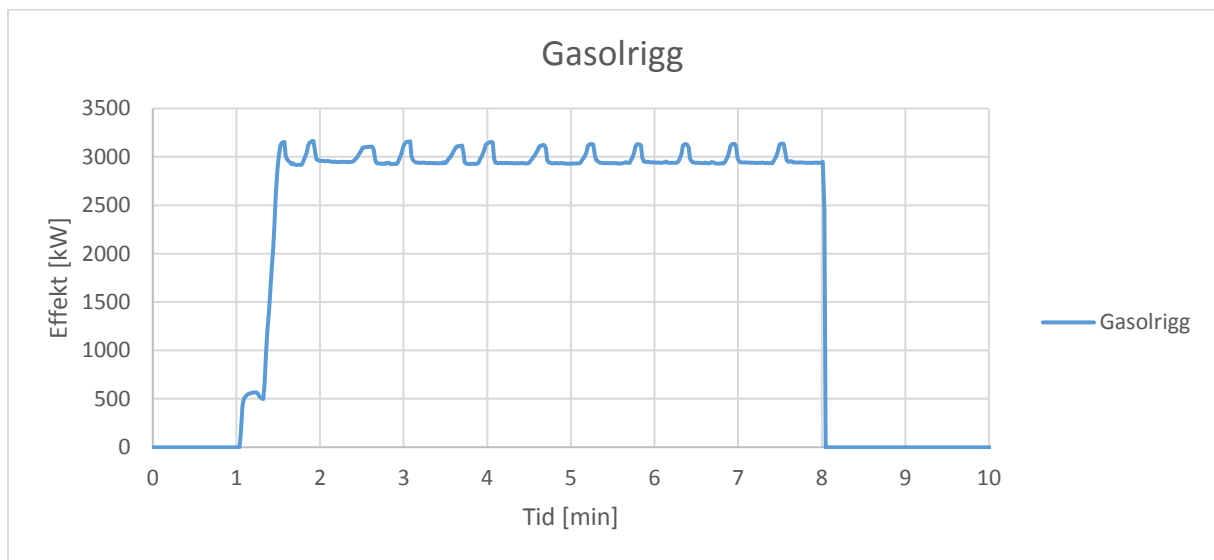
Figur 46 – Gasolriggens effekt försök 1



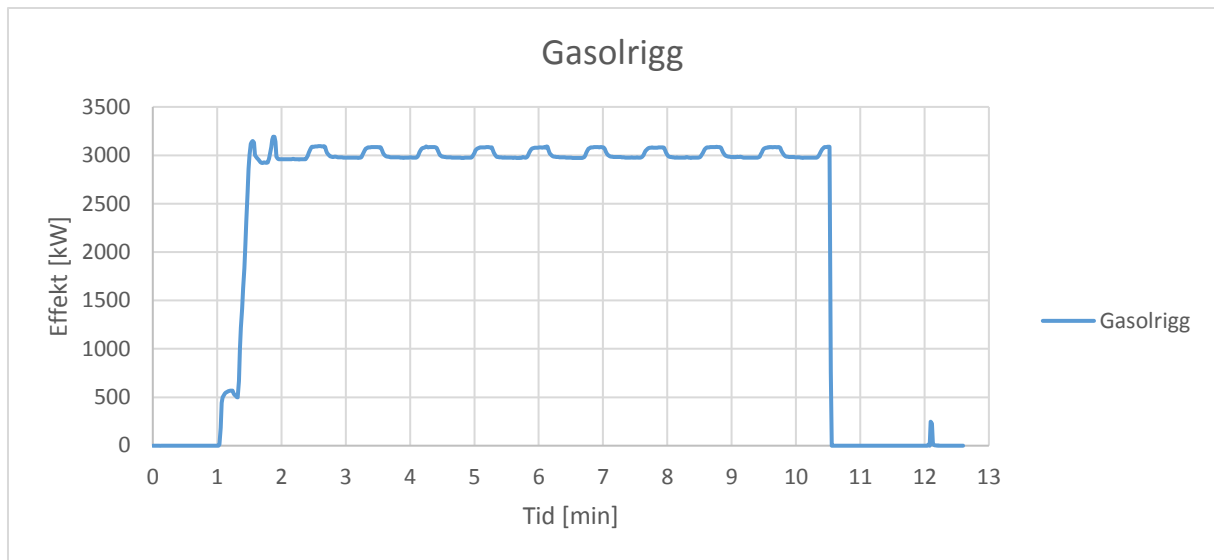
Figur 47 – Gasolriggens effekt försök 2



Figur 48 – Gasolriggens effekt försök 3



Figur 49 – Gasolriggens effekt försök 4



Figur 50 – Gasolriggens effekt försök 5