



## Termisk påverkan från läckande gasolslangar

Emil Hallberg  
Johan Sjöström  
Fredrik Kahl

RISE Rapport 2019:89

# Termisk påverkan från läckande gasolslangar

Emil Hallberg  
Johan Sjöström  
Fredrik Kahl

# Abstract

## **Thermal influence from leaking liquefied petroleum gas**

The radiant heat flux from 3 leakage scenarios of liquefied petroleum gas (LPG) was studied to determine safety distances when refilling LPG tanks from tank trucks. The three scenarios were a larger and a smaller leakage from a pipe and leakage from a textile reinforced rubber hose. Steady state tests with 5 minutes of burn time were performed as well as tests with 1 minute of burn time after which the emergency stop was activated. Measurements with water cooled heat flux meters and plate thermometers were used to determine heat flux levels. Measurements were designed to determine distances to heat fluxes of 12.5, 15 and 40 kW/m<sup>2</sup>. Heat fluxes were measured both parallel and perpendicular to the flames at the same height as the leakage and 1 meter above the leakage.

Key words: liquefied petroleum gas, LPG, heat flux. Leakage, fire

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2019:89

ISBN: 978-91-89049-19-2

Borås 2019

# Innehåll

<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>Innehåll</b> .....	<b>2</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Bakgrund</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Utrustning och mätning</b> .....	<b>5</b>
2.1 Värmefflöde.....	5
2.1.1 Värmefflödesmätare .....	5
2.1.2 Specialtillverkade Platt-termoelement.....	5
2.2 Tryck och temperatur .....	6
2.3 Rör, slang och läckage .....	6
2.3.1 Teststycke 1.....	7
2.3.2 Teststycke 2 .....	7
2.3.3 Teststycke 3 .....	7
<b>3 Provuppställning</b> .....	<b>9</b>
<b>4 Resultat</b> .....	<b>11</b>
4.1 Test 1 .....	11
4.1.1 Test 1 värmefflöden .....	13
4.2 Test 2.....	14
4.2.1 Test 2 värmefflöden .....	16
4.3 Test 3.....	18
4.3.1 Test 3 värmefflöden .....	20
4.4 Test 4.....	22
4.4.1 Test 4 värmefflöden .....	24
4.5 Test 5.....	26
4.5.1 Test 5 värmefflöden .....	28
<b>5 Diskussion och Slutsats</b> .....	<b>31</b>
5.1 Sammanställda data .....	31

# Sammanfattning

Studien utfördes på beställning- och finansierades av myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Testerna utfördes i samarbete med Energigas Sverige, som tillhandahöll utrustning och gasol, samt södra Älvsborgs Räddningstjänstförbund (SÄRF) som tillhandahöll anläggning och hjälpte till med säkerheten.

Värmestrålning från brinnande läckor från slangar och rör med gasol (Liquefied Petroleum Gas - LPG) mäts i tre olika scenarier för att ta fram underlag för säkerhetsavstånd vid tankning från tankbil till cistern. De tre scenariona delas in i stort och litet läckage från rör samt läckage ifrån en textilarmerad gummislang. Ett scenario med stationära förhållanden testas för alla tre fallen samt ett scenario där nödstopp aktiveras efter en minut för det stora läckaget och den textilarmerade gummislangen. Värmeflödet mäts både med vattenkyld värmeflödesmätare samt med plattermoelement. Mätningar görs i läckagets riktning, och vinkelrätt mot läckaget på avstånd framtagna för att fånga värmeflöden på 12.5 kW/m<sup>2</sup>. Mätningar görs i höjd med, samt en meter ovanför läckaget. Utöver värmeflöden så används värmekamera och bildhantering för att beräkna flammornas längd och höjd. Resultaten för värmeflöden på 12.5 kW/m<sup>2</sup> samt flammornas längd visas i Tabell 1. Avstånd även till 15 och 40 kW/m<sup>2</sup> återfinns i rapportens slutsats.

Tabell 1. Sammanfattade resultat som visar avstånd från läckage för ett värmeflöde på 12.5 kW/m<sup>2</sup> samt flammors storlek. Benämningen A-riktning innebär riktningen i linje med flammans utbredning.

	Teststycke Nr 1	Teststycke Nr 2	Teststycke Nr 3
	Rör, stort läckage	Slang, stort läckage	Rör, litet läckage
Värmeflöden för stationärt läckage: 12.5 kW/m <sup>2</sup>			
A-riktning. Höjd: I höjd med läckage	6 meter	8 meter	<2 meter
A-riktning. Höjd: En meter över läckaget	7 meter	9 meter*	<2 meter
Flamstorlek under stationärt förhållande			
Längd	Medel: 3.72 meter Spridning: 0.18 meter	Medel: 5.58 meter Spridning: 0.19 meter	Medel: 1.61 meter Spridning: 0.13 meter
Höjd	Medel: 3.67 meter Spridning: 0.13 meter	Medel: 3.79 meter Spridning: 0.08 meter	Medel: 1.21 meter Spridning: 0.14 meter

\* Beräknat konservativt utifrån förhållandet mellan 0.85 och 1.85 meter samt antagandet om  $\dot{q}_{inc}'' = Qr^{-\alpha}$  för stora avstånd. Se kapitel 5 för detaljer.

Beräknat konservativt utifrån förhållandet mellan 0.85 och 1.85 meter samt antagandet om  $Y = K^x$  för stora avstånd.

# 1 Bakgrund

Utformning av cisternanläggningar med gasol (LPG) baseras på säkerhetsavstånd utformade utifrån olika olycksfall. I Sverige finns ett behov att fastställa lämpliga säkerhetsavstånd vid lossning till en cisternanläggning i händelse av brand från ett läckage via ett slangbrott. Som underlag behövs validerade bedömningar av värmepåverkan från läckaget.

Syftet med studien är att mäta värmeflöden till olika avstånd från olika läckage. Fallet som simulerats är det mellan tankfordon och cistern där chauffören avbryter med hjälp av nödstopp efter 60 sekunder och ett fall där nödstopp inte används, dvs stationära förhållanden. Tre olika läckagescenarion undersöktes, ett större slitsformat hål samt ett mindre läckage runt läckage på ett tvåtums stålrör och ett läckage bestående av 6 små hål på en textilarmerad gummislang, de olika läckagestorlekarna listas tillsammans med framtagna testmatris om totalt 5 försök med 3 olika sorters läckage i Tabell 2. Vid försöken används en LPG-tankbil såsom den normalt används.

Tabell 2. Testmatris

	Teststycke Nr 1: Stålrör 2" med (sågad) slits 1.2 x 28 mm runt omkretsen. Total area: 34 mm <sup>2</sup> .	Teststycke Nr 2: Armerad gummislang 2" med sex hål à 2.5 mm i diameter. Total area: 29 mm <sup>2</sup> .	Teststycke Nr 3: Stålrör 3" med hål 1.5 mm diameter. Total area: 1.8 mm <sup>2</sup> .
Stationära förhållanden (ca 5 minuter)	Test 1	Test 3	Test 5
60 sekunder till aktiverat nödstopp, sedan följs förloppet till sitt slut	Test 2	Test 4	

## 2 Utrustning och mätning

Huvudsyftet var att mäta värmeflöden på olika avstånd från läckaget. Detta mättes med vattenkylda värmeflödesmätare samt specialtillverkade plattermoelement (PT). Utöver värmeflödet så mätes även tryck och temperatur i rören. Testerna utfördes onsdag den 4 september 2019 på Guttasjöns brandövningsplats i samarbete med SÄRF. Vädret under testerna var störstadel vindstill och utfördes när det inte regnade.

### 2.1 Värmeflöde

Infallande strålning bidrar till ökad temperatur på objekt i närheten av flammen och kan orsaka att ett föremål antänds. Om objektet befinner sig i flammen bidrar konvektiv värmeöverföring starkt till uppvärmning och lättantändliga material antänds ofta med lätthet. Utanför flammen påverkar istället konvektiv avkylning till att begränsa temperaturökningen i måttlig omfattning. Vid en konservativ situation (vindstill) är denna avkylning liten i förhållande till strålningsnivåer relevanta för antändning. För att bestämma säkerhetsavstånd mäts vid försöken strålningens infallande värmeflöde på tänkta objekt med värmeflödesmätare samt PT.

#### 2.1.1 Värmeflödesmätare

Tre värme-flödesmätare av modellerna Medtherm 64 - 2, kalibrerade för flöden mellan 0–20 kW/m<sup>2</sup>, användes för att både mäta totalt värmeflöde mot en kyld yta och för att validera beräkningen av värmeflöde till de specialtillverkade PT. Den kylda ytan innebär att den konvektiva avkylningen är minimal och mätaren mäter i praktiken enbart strålningsvärme om den är placerad utanför flammans omfång. Medtherm 64 - 2 är en vattenkyld värme-flödesmätare vars mätfläck är svartkroppsmålade och har hög emissivitet.

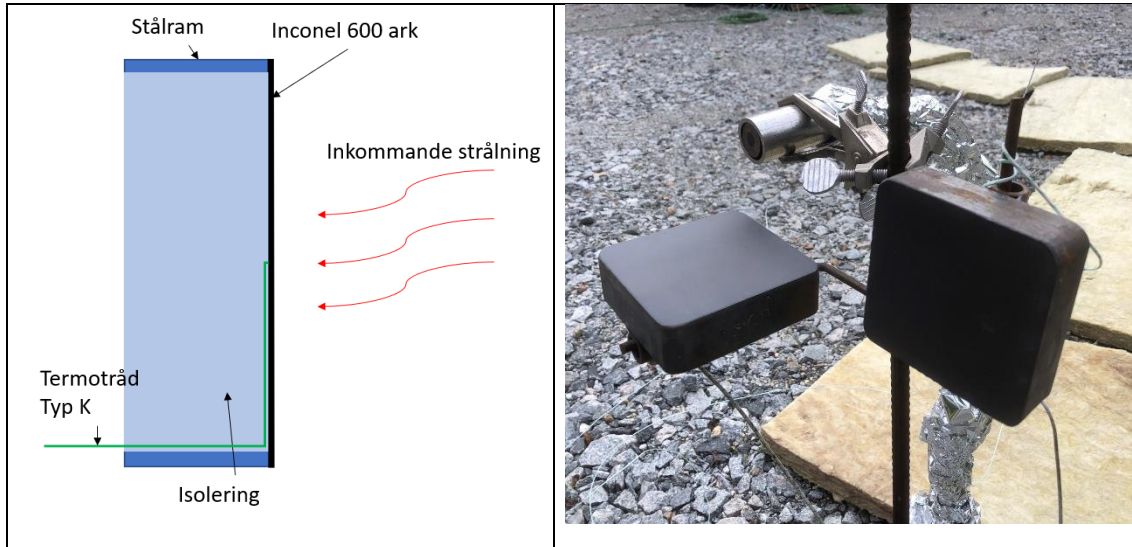
Värme-flödesmätarnas cirkulerande kylvatten hölls på 25 °C ± 0.1 °C med en Julabo F25 cirkulationskylare.

#### 2.1.2 Specialtillverkade plattermoelement

PT består av en större platta som reagerar både på värmestrålning och konvektiv värmeöverföring. PT är mer robusta än värme-flödesmätarna och har i tidigare test<sup>1</sup> använts för att beräkna det infallande värme-flödet mot ytan. Elementen för dessa test är specialtillverkade och består av en 5 mm tjock stålram med dimensionerna 100 x 100 x 30 mm. Den exponerade ytan består av en 0.4 mm tjock metallplåt av Inconel 600 ark fast svetsat på stålramen. Inconelplåten är målade på framsidan med högemissiv, LabIR-färg: HERP-HT-MWIR-BK-11. Färgen har hög temperaturbeständighet och har givna värden för ytemissiviteten beroende på temperatur. På baksidan av Inconelplåten fästs ett termoelement av typen K vilket täcks med 30 mm tjock keramisk isolering, se Figur 1.

---

<sup>1</sup> För exempel på tidigare tillämpning av dessa specialtillverkade PT se J. Sjöström et al (2015), Thermal exposure from large scale ethanol fuel pool fires, Fire Safety Journal, vol. 78, pp 229-237



Figur 1. Specialtillverkade Plattermolement

Temperaturmätning med PT är väldokumenterat som underlag till att beräkna det inkommande värmeflödet i normalorientering mot ytan genom relationen<sup>2</sup>:

$$q''_{inc} = \sigma T_{PT}^4 + \frac{(h + K_{PT})(T_{PT} - T_{amb}) + C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt}}{\epsilon_{PT}}$$

Där  $h$  är den konvektiva värmeöverföringskoefficienten mellan den utsatta ytan och luft.  $T_{PT}$  och  $T_{amb}$  är PT-elementens och den omgivande luftens temperatur,  $\epsilon_{PT}$  är den utsatta ytans emissivitet och  $\sigma$  är Stefan-Boltzmann's konstant.  $K_{PT}$  och  $C_{PT}$  är korrelationsparametrar för värmeförlust och värmeförvaring i PT elementet.  $K_{PT}$  och  $C_{PT}$  väljs så att det beräknade infallande värmeflödet ( $q''_{inc}$ ) kurvan passar in på det uppmätta värmeflödet med de vattenkylda värmeflödesmätarna. För dessa PT element så är  $K_{PT} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$  och  $C_{PT} = 2800 \text{ J/m}^2\text{K}$ . Med dessa konstanter så är det beräknade värmeflödet nära det uppmätta med värmeflödesmätare för samtliga PT.

## 2.2 Tryck och temperatur

Mätinstrument för tryck (DMU 03) och temperatur (PT-100) tillhandahålls av Energigas Sverige och loggades av RISE. Temperatur och tryck mätes i röret mellan läcka och tankbil, ca 5 meter ifrån läckaget.

## 2.3 Rör, slang och läckage

Tre olika läckagescenarion skulle simuleras, det första för att likna skada på rör, det andra för att likna läckage vid flänsarna och det tredje för att likna läckage ifrån slang. De scenario som valdes och vilken skada på rör eller slang som dessa skulle representeras av bestämdes av samråd mellan MSB och Energigas Sverige. Samtliga läckage skedde radiellt ut ifrån respektive provstycke och med flöde med gasol i vätskefas. Väl utanför läckaget evaporerar vätskan hastigt och strålen består av en vätske/gas-blandning.

<sup>2</sup> För beskrivning av konceptet, se H. Ingason & U. Wickström (2007), Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer, Fire Safety Journal, vol. 42, pp 161-166.



Testen utfördes med ett tryck på nominellt 8 bar i matande cistern (från tankbilen) plus ett differenstryck på ca 2 bar för att kunna lossa till kundcistern.

### 2.3.1 Teststycke 1

Teststycke 1 var ett 1.5 meter långt stålrör med en diameter på 60.3 mm och en tjocklek på 2 mm. Hålet var ca 1.2 mm brett 28 mm runt omkretsen vilket ger en area på 34 mm<sup>2</sup>, se Figur 2. Teststycke 1 användes för att simulera ett stort läckage pga skada på rör.



Figur 2. Teststycke 1. Rör med sågad slits.

### 2.3.2 Teststycke 2

Teststycke 2 består av en 1.5 meter lång textilarmerad lossningsslang. Slangen har sex 2.5 mm hål med en total area på 29 mm<sup>2</sup>. Se Figur 3.



Figur 3. Teststycke 2. Textilarmerad slang.

### 2.3.3 Teststycke 3

Teststycke 3 bestod av samma sorts rör som teststycke 1 men hade ett hål på 1.77 mm<sup>2</sup> och designades för att likna ett litet läckage vid flänsarna.

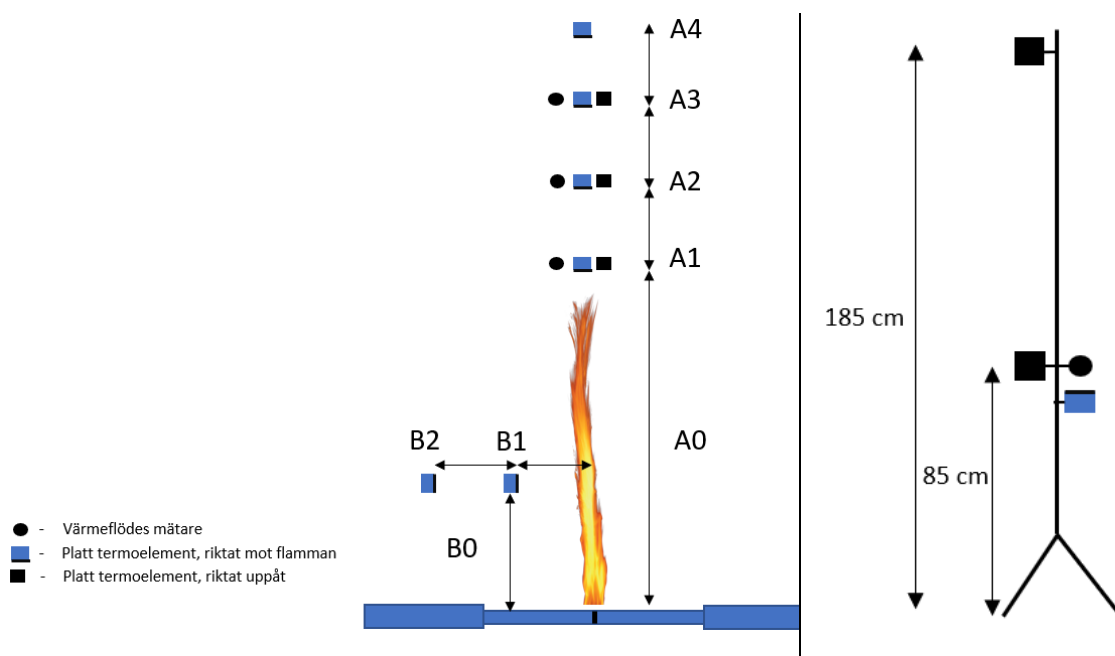


Figur 4. Teststycke 3. Rör med borrarat hål

### 3 Provuppställning

All utrustning rörande gasen införskaffades, monterades och underhölls av Energigas Sverige. Instrumenteringen sattes upp för att mäta inkommande värmefflöden parallellt och vinkelrät mot flammen. Läckaget skedde 0.85 meter ovanför marken och i samma höjd sattes första mätnivån, andra mätnivån sattes 1.85 meter över marken, se Figur 5. Vinkelrät mot flammen så mättes värmefflödet på avstånd, A1, A2, A3 och A4. I position A1, A2 och A3 mättes inkommande strålning både med värmefflödesmätare och PT orienterat vertikalt och horisontellt mot flammen på 0.85 meters höjd samt med ett PT riktat vertikalt mot flammen på 1.85 meters höjd. A4 har ett PT riktat vertikalt mot flammen på 0.85 meters höjd. B1 och B2 har 2 PT, båda riktade vertikalt mot flammen. Höjden på dessa var 1.1 samt 1.85 meter för B1 samt 0.85 samt 1.85 för B2. Se Figur 5 för en skiss på provuppställningen och Tabell 3 för avstånden för respektive mätpunkt.

Varje försök dokumenterades dessutom med videokamera samt IR-kamera.



Figur 5. Instrumenteringsskiss. Vänster provuppställningen sett ovanifrån. Höger mätninstrumenten i höjddled.

Test 1, 2, 3 och 4 använde samma avstånd i testuppställningen. Inför test 5, med litet läckage ifrån stålrör, så flyttades mätutrustningen närmare flammen då den förväntade flamstorleken var mindre. Avstånden sattes så att den inkommande värmeinstrålningen mellan den närmsta och mest avlägsna mätpunkten skulle vara mellan 0 och 25 kW/m<sup>2</sup>. Avstånden för varje test finns i Tabell 3.

Tabell 3. Avstånden mellan mätstationer och läckage för respektive test i meter.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
A0	5	5	5	5	3.1
A1	5	5	5	5	3.1
A2	6	6	6	6	4
A3	7	7	7	7	5.3
A4	8	8	8	8	2
B0	3	3	3	3	2
B1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
B2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

## 4 Resultat

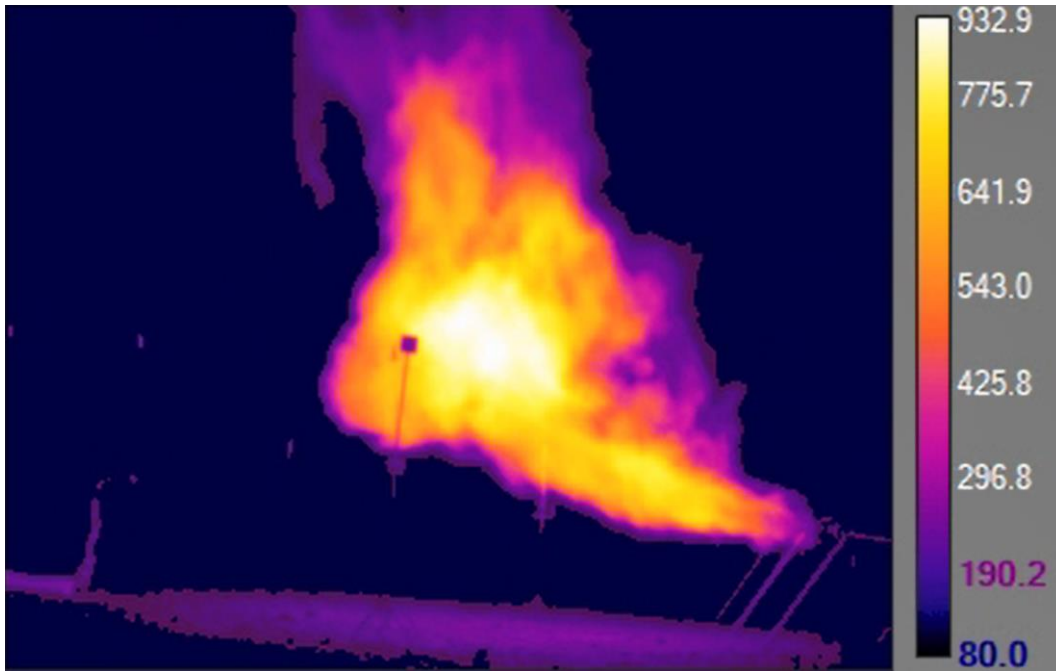
Resultaten för de enskilda testerna visar flammans utbredning och värmeflödet för varje scenario.

### 4.1 Test 1

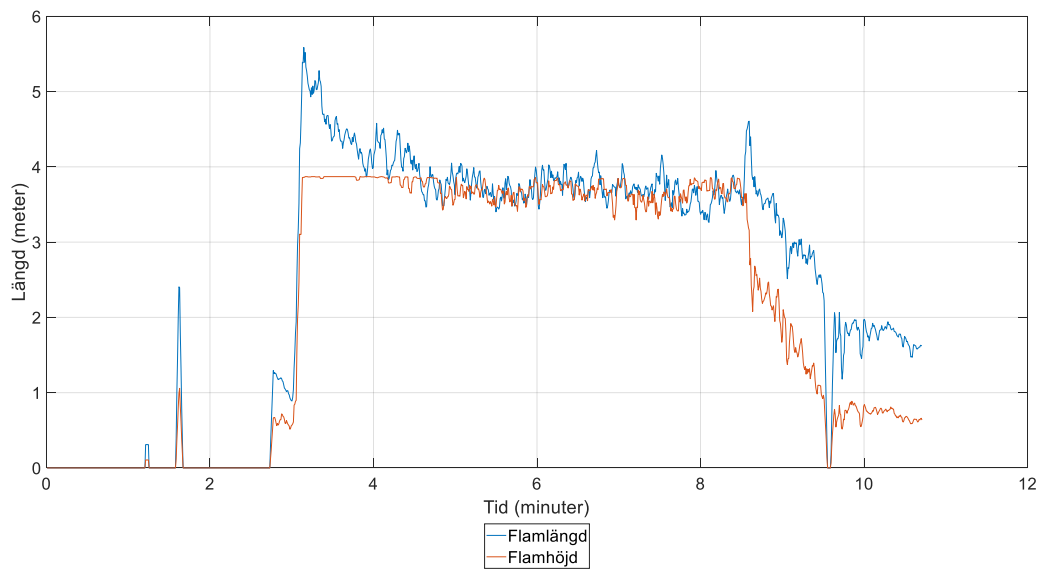
Test 1 var ett stort läckage (läckage på rör) med ett hål på 34 mm<sup>2</sup> vilket gav en flamlängd på strax över 4 meter och en flamhöjd på över 4 meter. Test 1 simulerade stationära förhållanden och har därför en total läckaetid på 5 minuter. Det operativa trycket, dvs uppmätt tryck ca 5 meter ifrån läckaet, låg på ca 8 bar med en maximal spik vid tändning på ca 10 bar och rörets temperatur steg under testets gång ifrån 11 °C till maximalt 17 °C, vilket visas i Figur 9. Den karakteristiska flamman för test 1 visas, i RGB format, i Figur 6 och med värmekamera i Figur 7. Flammans längd och höjd över hela test 1 visas i Figur 8



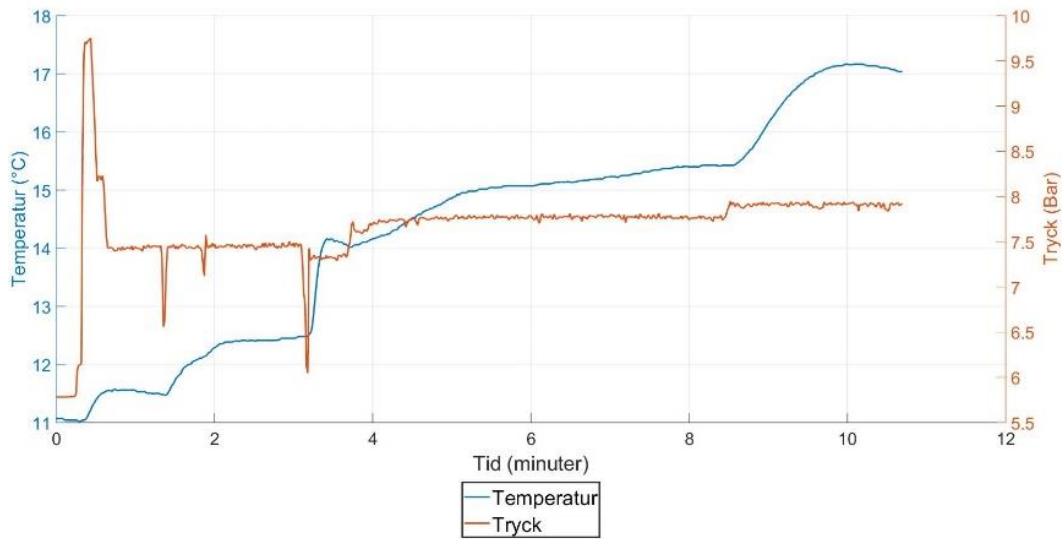
Figur 6. Karakteristisk flamma för test 1



Figur 7. Värmekamerabild för test 1. Skalan till höger visar flammans temperatur baserad på dess strålning till IR-kameran.



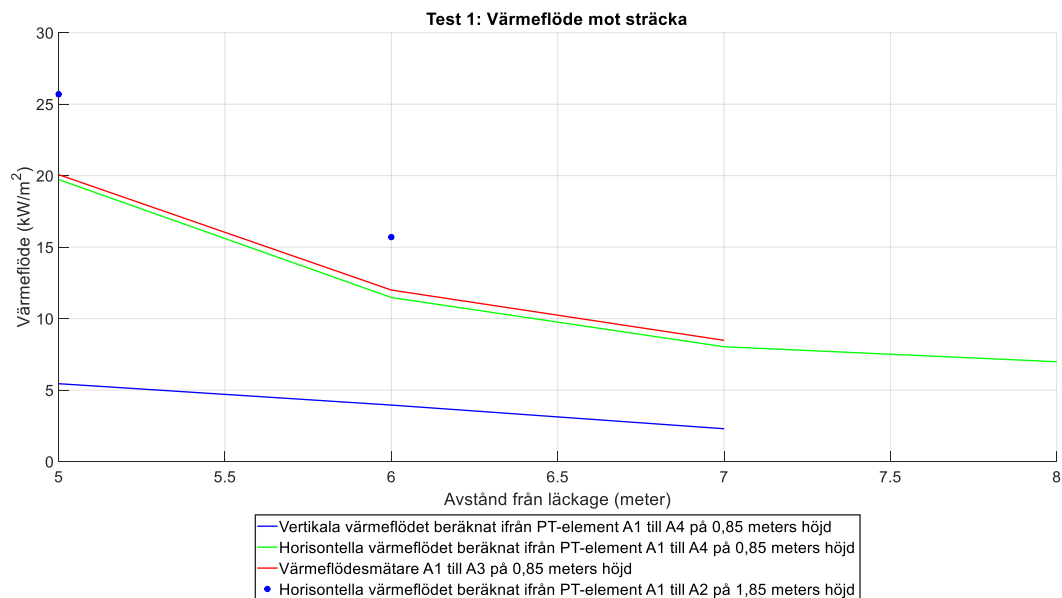
Figur 8. Flamlängd och höjd för test 1. Flamhöjden begränsas av kamerans synfält till 3.9 meter. Spikarna i början är antändning av läckande gasol utan att kontinuerligt brinnande flamma bildats.



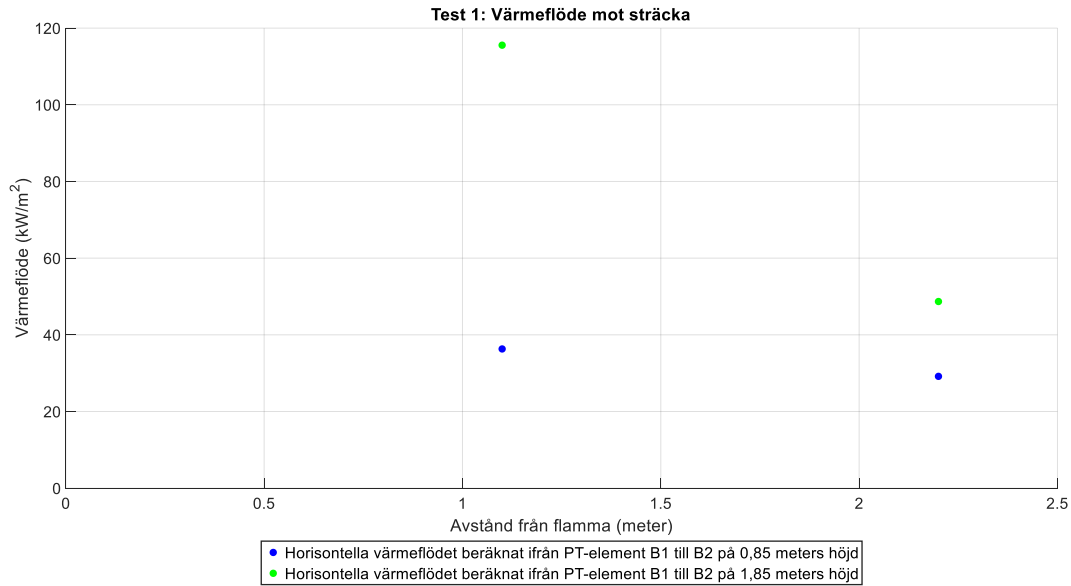
Figur 9. Bränslets tryck och temperatur i röret för test 1.

#### 4.1.1 Test 1 värmeflöden

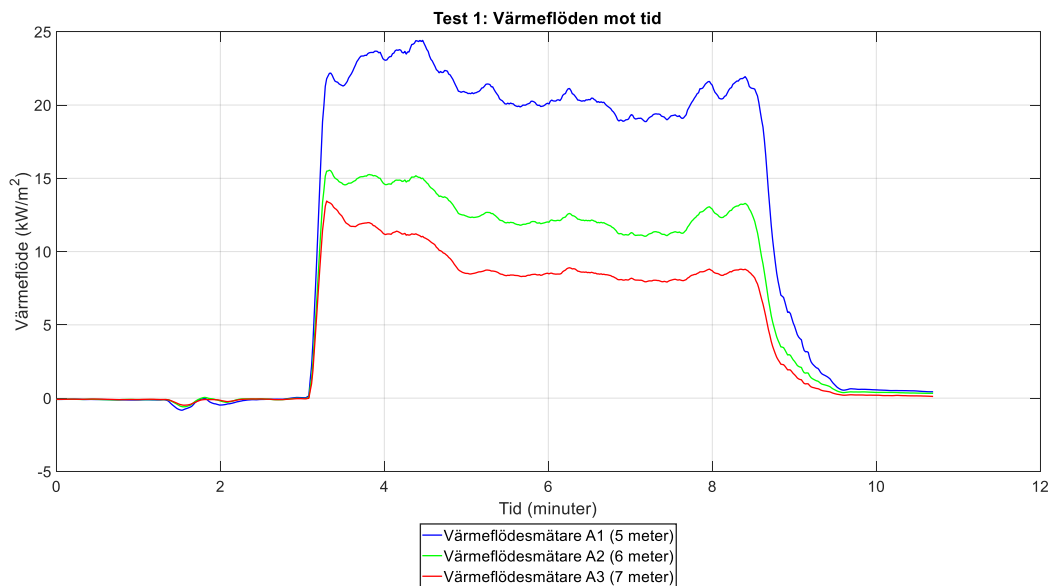
Värmeflödet under test 1 var som högst vid punkt A1, närmast läckaget. I början på testet, då även trycket spikade på 9.5 bar, nådde värmeflödet 24 kW/m<sup>2</sup> men sjönk till 20 kW/m<sup>2</sup> under stationära förhållanden. Värmeflödet sjönk från 20 kW/m<sup>2</sup> vid 5 meters avstånd, till 12 kW/m<sup>2</sup> vid 6 meters avstånd och var under 10 kW/m<sup>2</sup> efter 6.5 meter som ses i Figur 10. Värmeflödesmätaren vid position B1 på 1.85 meters höjd hade under större delar av testet direkt påverkan av flammen och visar därför mycket höga värden. PT vid B1 på 1.1 meters höjd samt både B2 på 0.85 meter och 1.85 meter klarade sig ifrån flammorna. Värmeflödet för position B visas i Figur 11.



Figur 10. Test 1, värmeflödet på vid position A1 till A4 efter 1.5 minuters testtid. Avstånden är följande: A1 = 5 meter, A2 = 6 meter, A3 = 7 meter och A8 = 8 meter



Figur 11. Test 1, värmefflödet vid position B1 och B2 efter 1.5 minuters testtid. Avstånden är följande: B1 = 1.1 meter och B2 = 2.2 meter.



Figur 12. Test 1, uppmätta värmefflödesnivåer med värmefflödesmätare vid position A1 - A3.

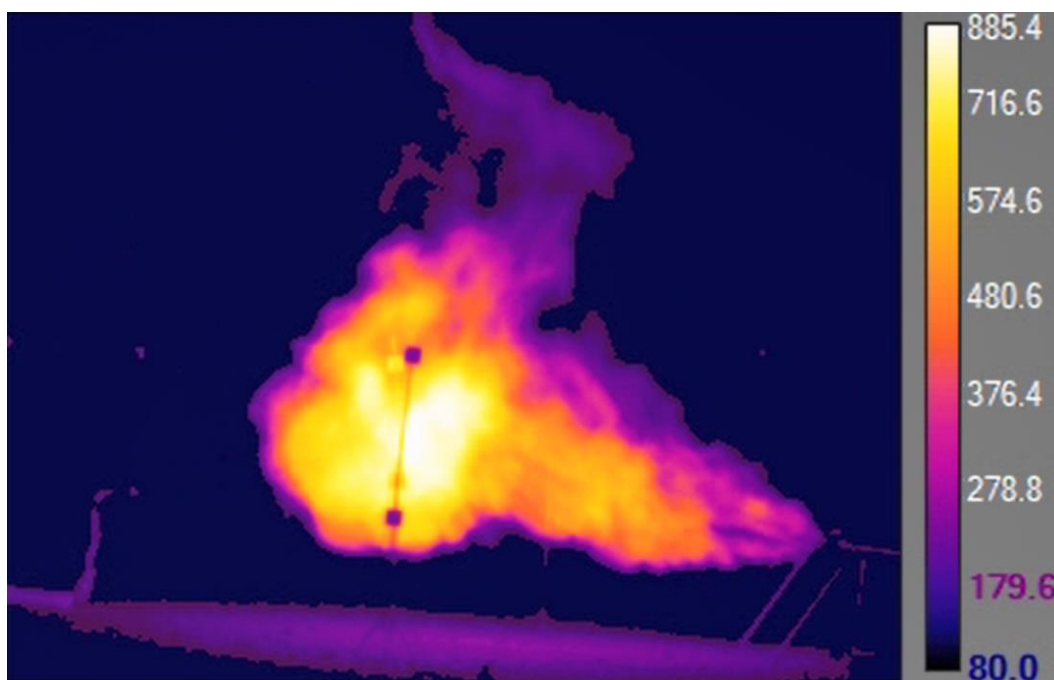
## 4.2 Test 2

Test 2 var, precis som test 1, ett s.k. stort läckage (läckage i rör) med samma teststycke (total area: 34 mm<sup>2</sup>) vilket gav en flamlängd på strax över 4 meter och en flamhöjd på över 4 meter innan nödstoppet aktiverades efter 60 sekunder och trycket sjönk. Efter nödstoppet aktiverades minskade flammans i omfattning tills den slutligen slocknade av sig själv. Detta resulterade i en total läckagetid på ca 6 minuter. Det operativa trycket låg på ca 8 bar fram tills det att nödstoppet aktiverades, därefter sjönk trycket kontinuerligt ner till 2 bar. Rörets temperatur steg från 15 °C till ca 15.5 °C innan nödstoppet aktiverades varefter temperaturen sjönk till som lägst 7 °C. Tryck och temperatur för test 2 visas i Figur 16. Den karakteristiska flammans för test 2 visas, i RGB format, i Figur 13 och med värmekamera i Figur 14. Flammans längd och höjd över hela test 2 visas i Figur 15.

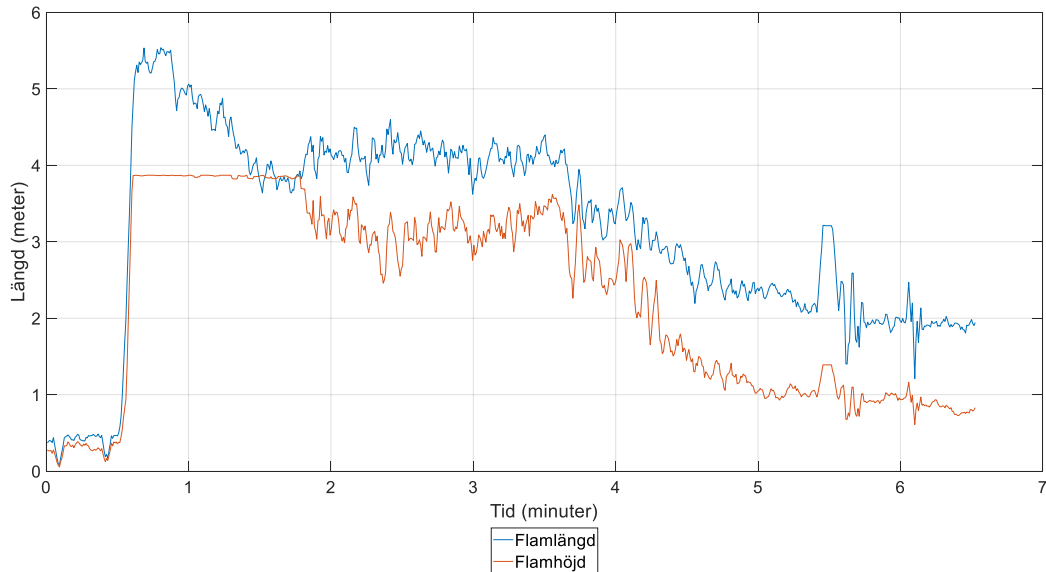




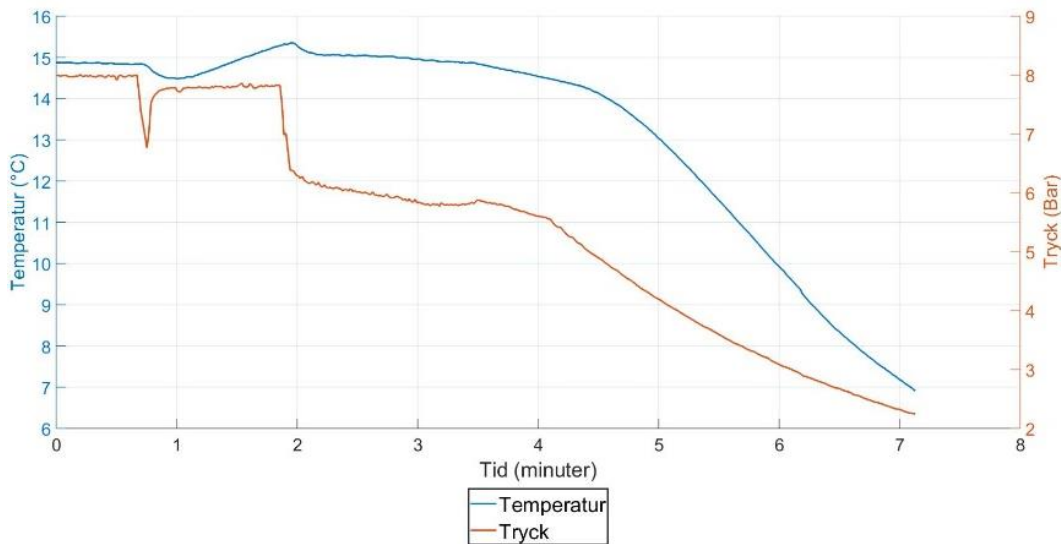
Figur 13. Karakteristisk flamma för test 2



Figur 14. Värmekamerabild för test 2. Skalan till höger visar flammans temperatur baserad på dess strålning till IR-kameran.



Figur 15. Flamlängd och höjd för test 2. Flamhöjden begränsas av kamerans synfält till 3.9 meter. Nödstoppet aktiverades efter 1.85 minuter.

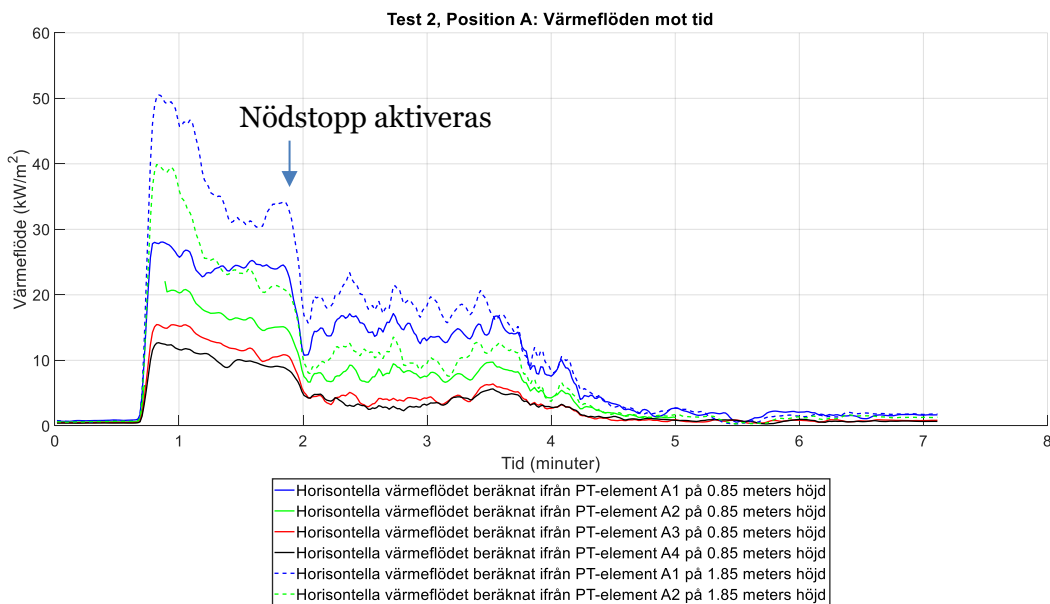


Figur 16. bränslets tryck och temperatur i röret, test 2. Nödstoppet aktiverades efter 1.85 min.

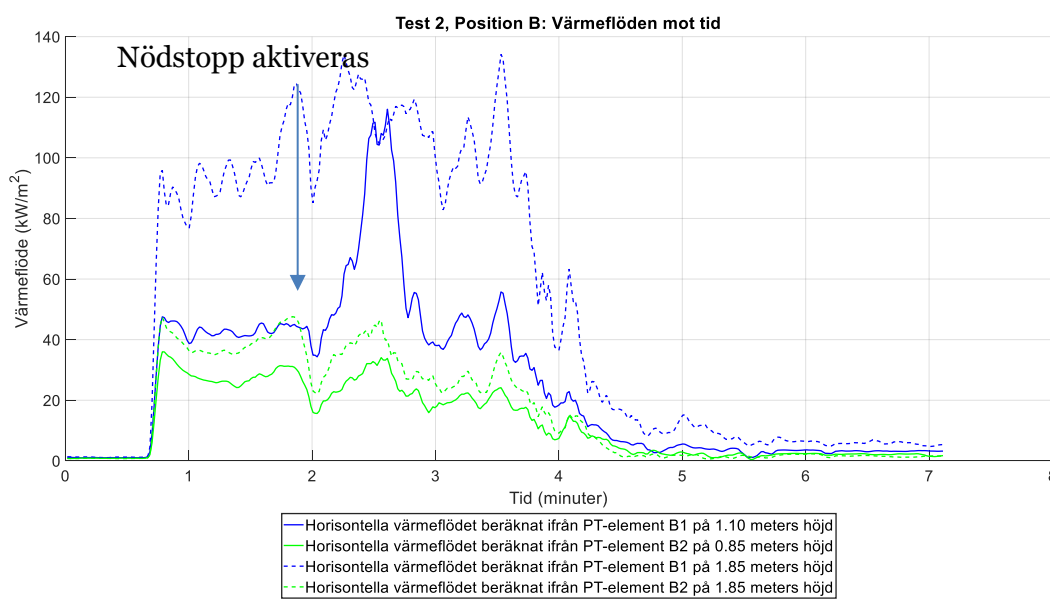
#### 4.2.1 Test 2 värmeflöden

Värmeflödet under test 2 var som högst vid position A1 på 1.85 meters höjd (förutom PT vid position B1 på 1.85 meters höjd som vid flera tillfällen exponerades för direkt flammpåverkan). Det högst uppmätta värmeflödet vid A1 var på 50 kW/m<sup>2</sup> vilket visas i Figur 17. En markant minskning på värmeflöde skedde när nödstoppet aktiveras vid samtliga mätpunkter, exempelvis vid A1 på 1.85 meters höjd så sjönk värmeflödet ifrån 35 kW/m<sup>2</sup> till 20 kW/m<sup>2</sup> direkt när nödstoppet aktiverats, vilket visas i Figur 17. Värmeflödet vid B positionerna stod närmare läckaget så minskningen i värmeflöde blev

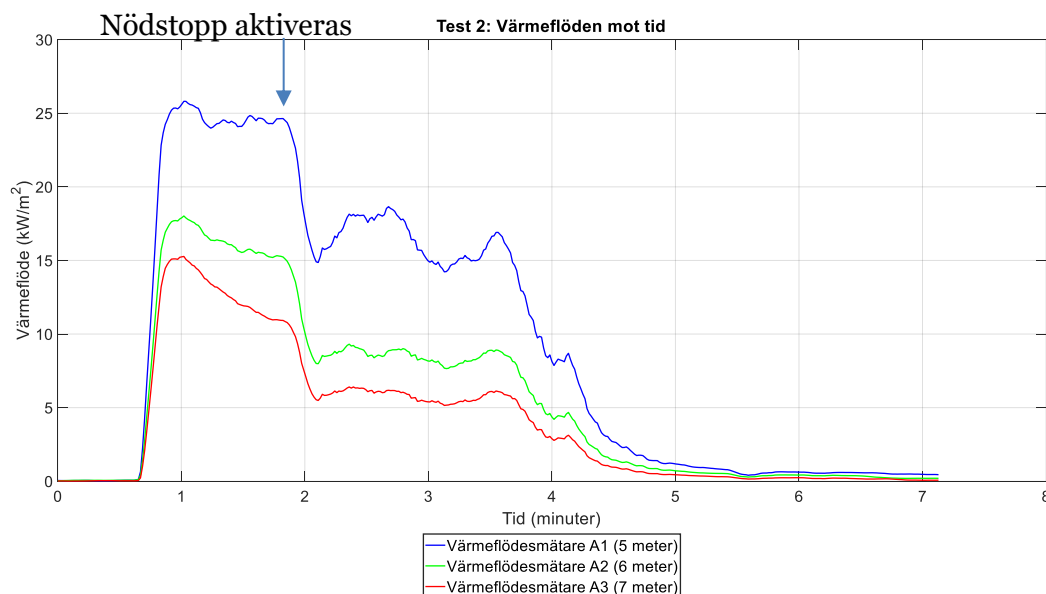
inte lika markant som för position A, vilket visas i Figur 18. Värmeflödesnivåerna över tid uppmätta med värmeflödesmätare visas i Figur 19.



Figur 17. Test 2, Värmeflöden beräknat från samtliga vertikala (mäter horisontellt värmeflöde) PT i position A1-A4. Avstånden är följande: A1 = 5 meter, A2 = 6 meter, A3 = 7 meter och A4 = 8 meter



Figur 18. Test 2, Värmeflöden beräknat från samtliga vertikala (mäter horisontellt värmeflöde) PT i position B1-B2. Avstånden är följande: B1 = 1.1 meter och B2 = 2.2 meter.



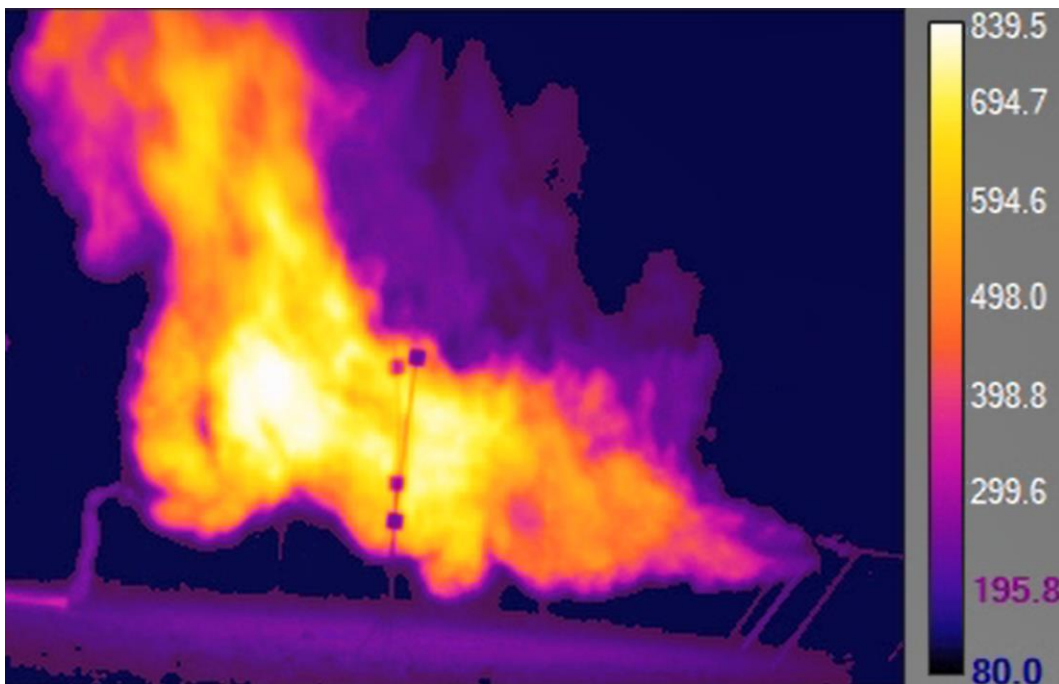
Figur 19. Test 2, uppmätta värmeflödesnivåer med värmeflödesmätare vid position A1 - A3 på 0.85 meter höjd.

## 4.3 Test 3

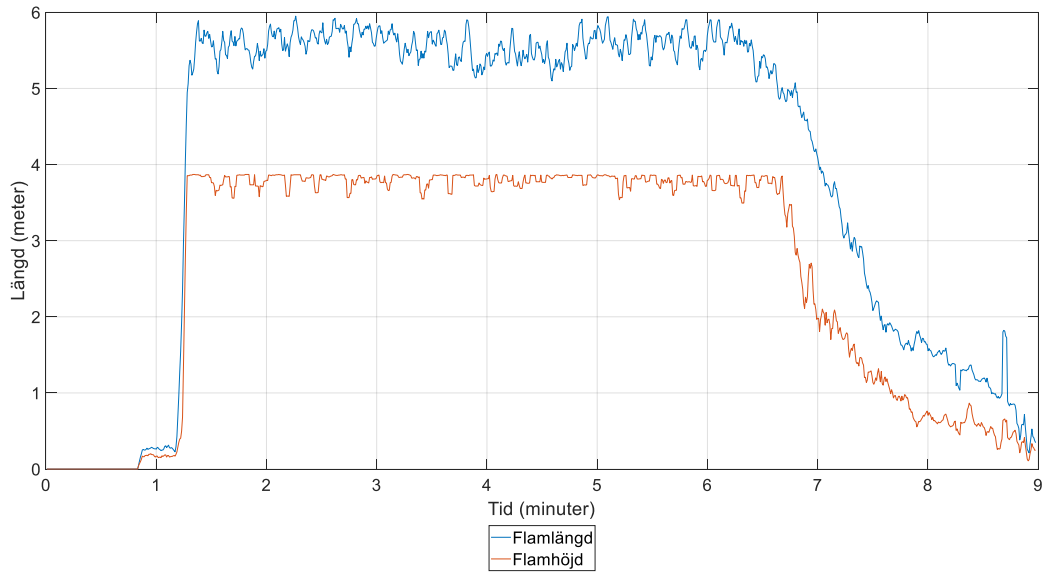
Test 3 var ett läckage från en textilarmerad gummislang med 6 cirkulära hål och en total area på 29 mm<sup>2</sup> vilket gav en flamlängd på 5.5 – 6 meter och en flamhöjd på över 4 meter. Test 3 skulle uppnå stationära förhållanden och har därför en total läckagetid på 5 minuter. Det operativa trycket låg på ca 8 bar och en temperatur som spikar på ca 21 °C för att sedan stabiliseras på ca 16 grader i 5 minuter, tryck och temperatur för test 3 visas i Figur 23. Den karakteristiska flammans, som visas i RGB format i Figur 20 och från värmekamera i Figur 21, var längre än för test 1 och 2 men ungefär lika hög. Denna skillnad speglas även i de uppmätta värmeflödena. Flammans längd och höjd för hela test 3 visas i Figur 22.



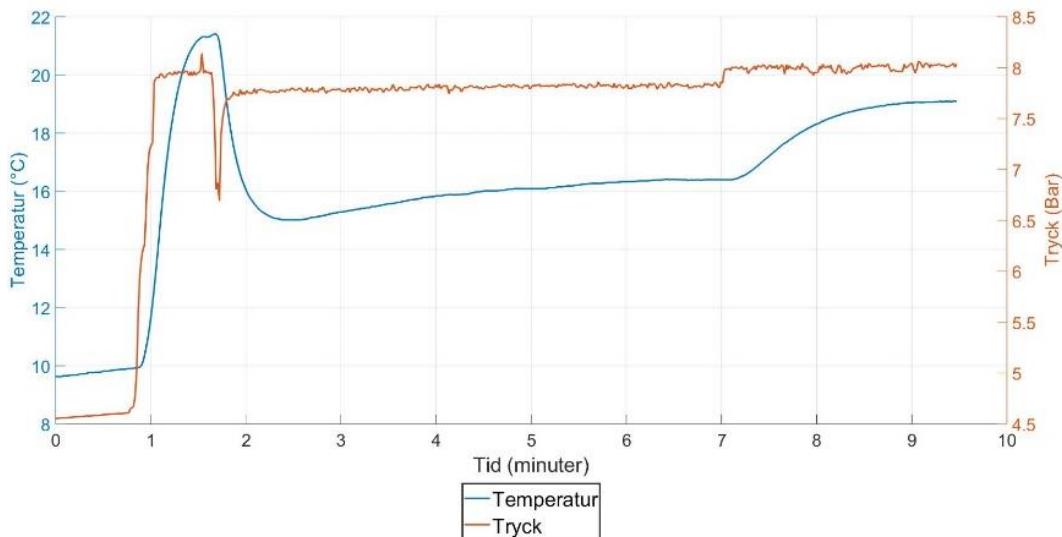
Figur 20. Karakteristisk flamma för test 3.



Figur 21. Värmekamerabild för test 3. Skalan till höger visar flammans temperatur baserad på dess strålning till IR-kameran.



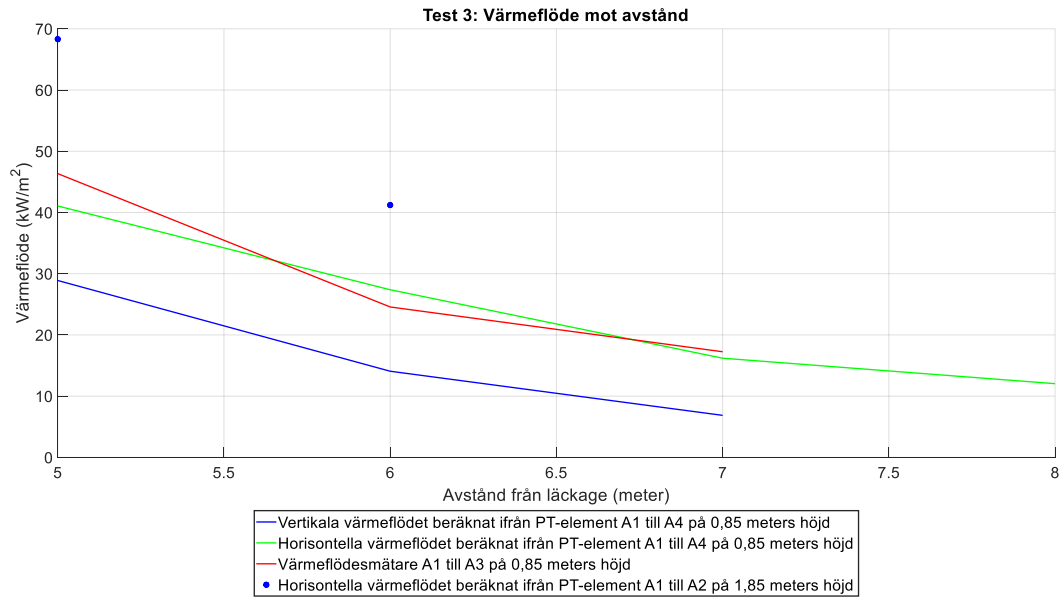
Figur 22. Flamlängd och höjd för test 3. Flamhöjden begränsas av kamerans synfält till 3,9 meter.



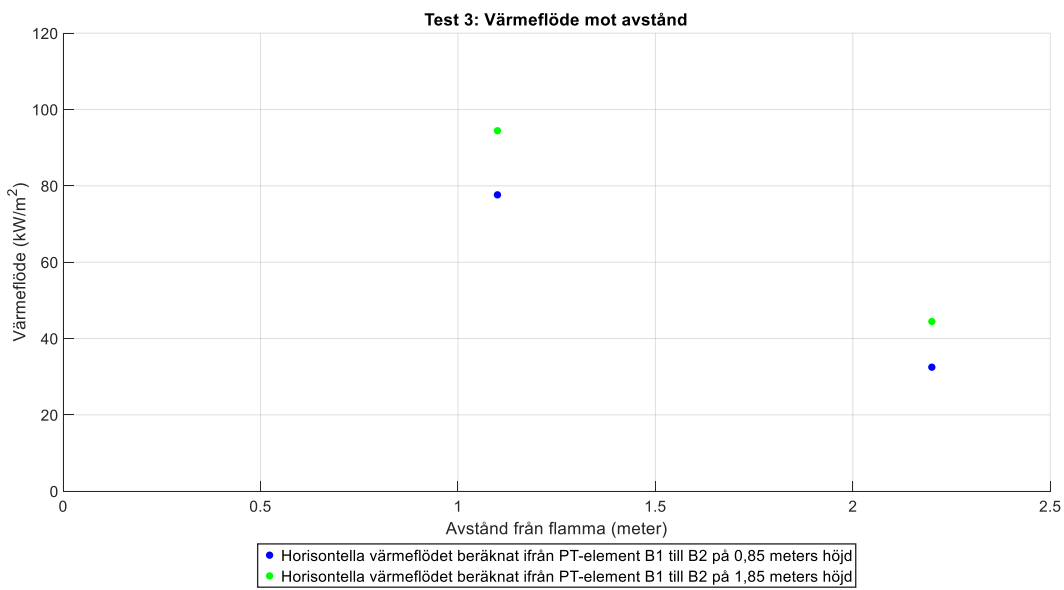
Figur 23. Bränslets tryck och temperatur i röret för test 3.

### 4.3.1 Test 3 värmeflöden

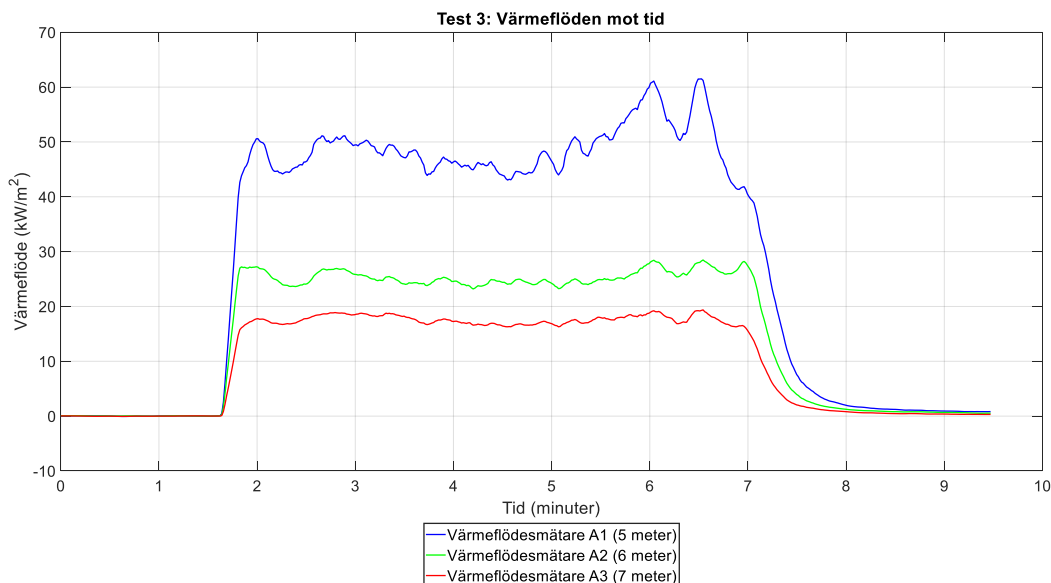
Värmeflödet under test 3 var som högst vid position B1 på 1.85 meters höjd på 95 kW/m<sup>2</sup>. Vid position A1, närmast läckaget, på 1.85 meters höjd, under stationära förhållanden, så låg värmeflödet runt 45 kW/m<sup>2</sup> med en stigning upp till 60 kW/m<sup>2</sup> framåt slutet. Värmeflödet sjönk från 45 kW/m<sup>2</sup> vid 5 meters avstånd, till 25 kW/m<sup>2</sup> vid 6 meters avstånd och var strax under 20 kW/m<sup>2</sup> efter 6.5 meter, vilket visas i Figur 26. Det beräknade värmeflödet till PT vid B1 på 1.1 och 1.85 meter samt B2 på 0.85 och 1.85 meters höjd visas i Figur 25. Värmeflödesnivåerna över tid uppmätta med värmeflödesmätare visas i Figur 26.



Figur 24. Test 3, värmeflödet vid position A1 till A4 efter 2 minuters testtid. Avstånden är följande: A1 = 5 meter, A2 = 6 meter, A3 = 7 meter och A8 = 8 meter



Figur 25. Test 3, värmeflödet vid position B1 och B2 efter 2 minuters testtid. Avstånden är följande: B1 = 1.1 meter och B2 = 2.2 meter.



Figur 26. Test 3, uppmätta värmeflödesnivåer med värmeflödesmätare vid position A1 - A3 på 0.85 meters höjd.

## 4.4 Test 4

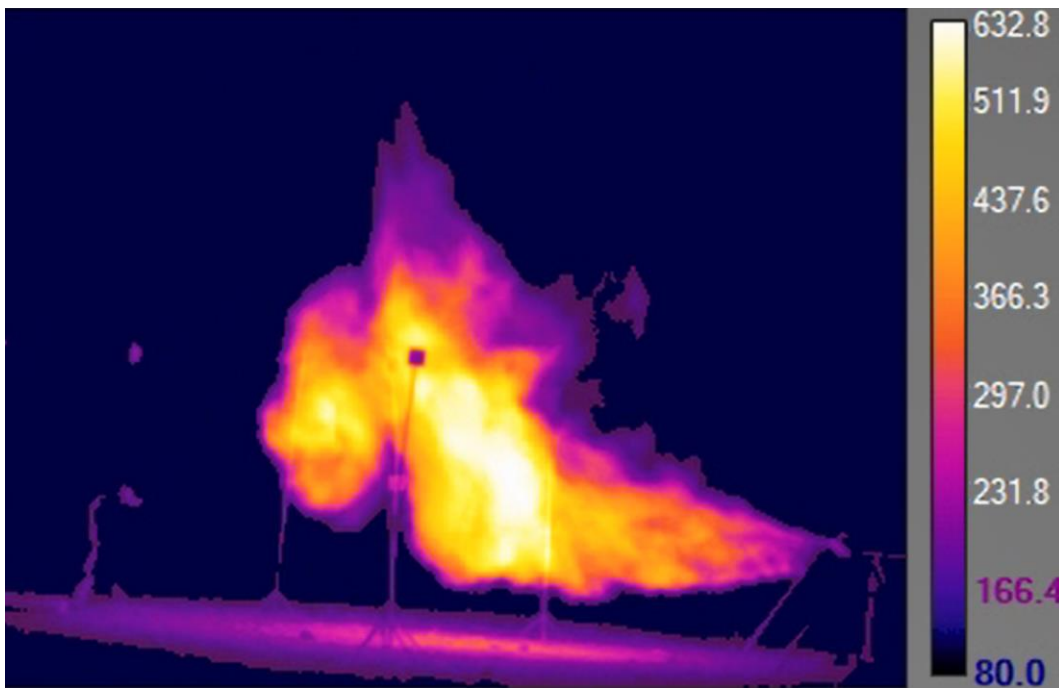
Test 4 var ett läckage från samma textilarmerad slang som i Test 3 (6 cirkulära hål och en total area på 29 mm<sup>2</sup>) vilket gav en max flamlängd på 5.5 – 6 meter och en flamhöjd på över 4 meter innan nödstoppet aktiverades. Test 4 läckte i 60 sekunder varefter nödstoppet aktiverades och flammen brann till dess att den sloknade av sig själv. Det operativa trycket låg på ca 8 bar fram till nödstoppet aktiveras varefter det kontinuerligt sjönk till ca 3 bar. Starttemperaturen låg på 18 °C för att sedan sjunka och stabiliseras på ca 16 grader innan nödstoppet aktiveras. Efter aktiverat nödstopp så sjönk temperaturen till 9 °C. Tryck och temperatur för test 4 visas i Figur 30. Den karakteristiska flammen, visas i RGB format i Figur 27 och från värmekamera i Figur 28. Flammen, var innan nödstoppet aktiverades längre än för test 1 och 2 men ungefär lika hög. Efter att nödstoppet aktiverats så behöll flammen en mer avlång figur än i test 1 och 2. Flammans längd och höjd för hela test 4 visas i Figur 29.

Hålen i slangen var efter läckagen och bränderna i test 3 och 4 oförändrade utefter visuell inspektion.

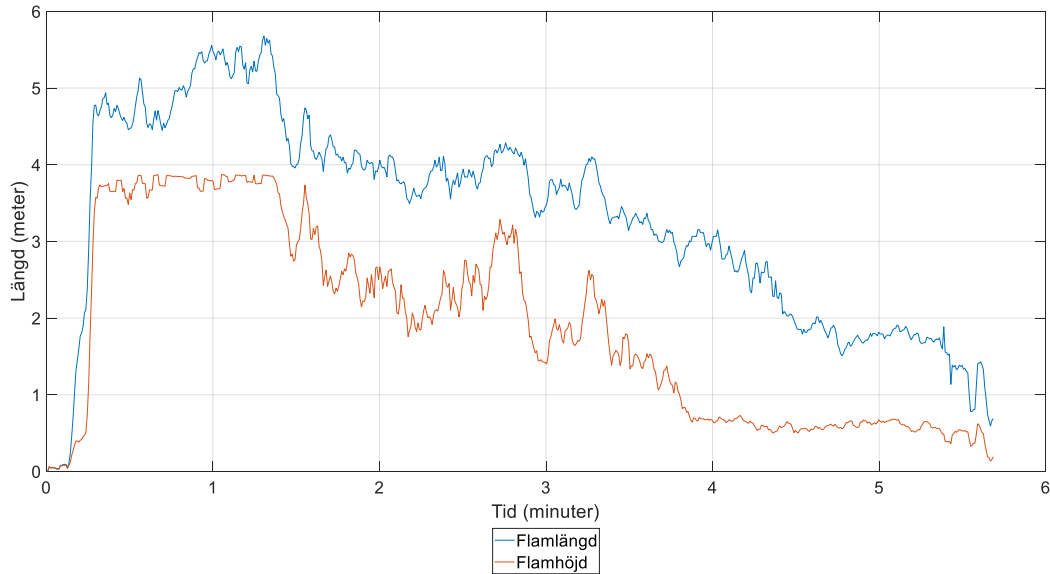




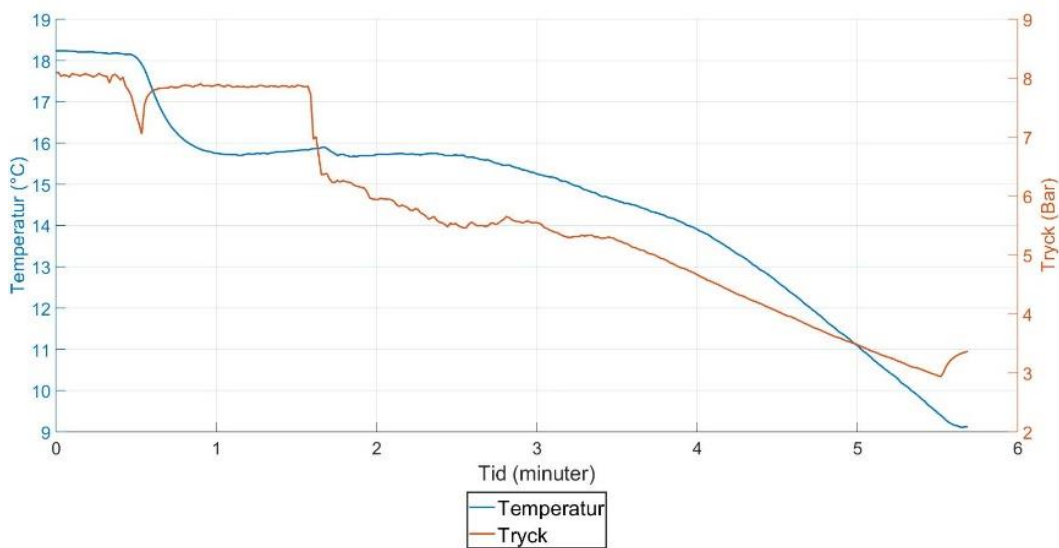
Figur 27. Karakteristisk flamma för test 4.



Figur 28. Värmekamerabild för test 4. Skalan till höger visar flammans temperatur baserad på dess strålning till IR-kameran.



Figur 29. Flamlängd och höjd för test 4. Flamhöjden begränsas av kamerans synfält till 3.9 meter. Nödstoppet aktiveras efter 1.55 minuter.

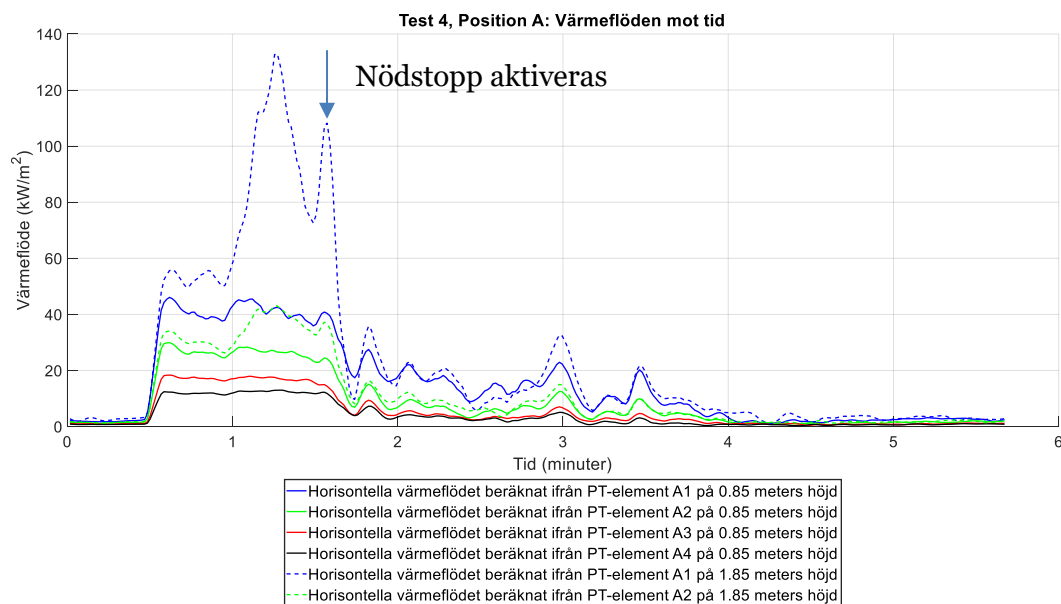


Figur 30. Bränslets tryck och temperatur för test 4.

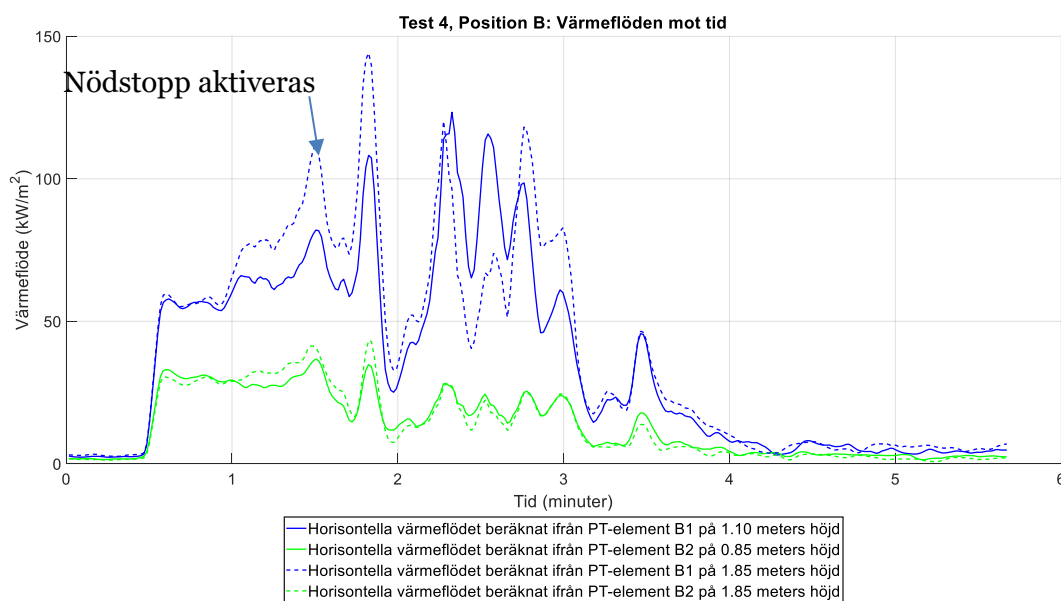
#### 4.4.1 Test 4 värmeflöden

Värmeflödet under test 4 var som högst vid position A1 på 1.85 meters höjd. PT vid position A1 och B1 på 1.85 meters höjd var vid flera tillfällen i flamman. Det högst uppmätta värmeflödet vid A1 på 1.85 meters höjd, utan att bli påverkad av flamman, var på ca 50 kW/m<sup>2</sup>. En markant minskning på värmeflöde skedde när nödstoppet aktiveras vid samtliga mätpunkter, exempelvis vid A1 på 0.85 meters höjd så sjönk värmeflödet ifrån 40 kW/m<sup>2</sup> till 20 kW/m<sup>2</sup> direkt när nödstoppet aktiverats, vilket visas i Figur 31. För värmeflödet vid B-positionerna, som stod närmare läckaget, var minskningen i

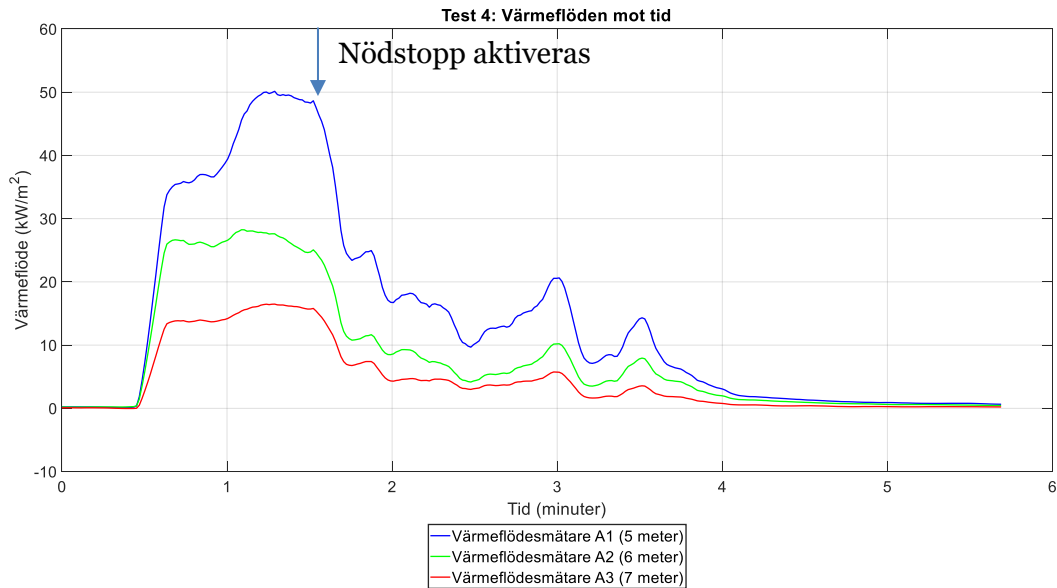
värmefflöde inte lika markant som för position A men ändå urskiljbart, vilket visas i Figur 32. Värmefflöden över tid uppmätta med värmefflödesmätare visas i Figur 33.



Figur 31. Test 4, Värmefflöden beräknat från samtliga vertikala (mäter horisontellt värmefflöde) PT i position A1-A4. Avstånden är följande: A1 = 5 meter, A2 = 6 meter, A3 = 7 meter och A4 = 8 meter



Figur 32. Test 4, Värmefflöden beräknat från samtliga PT i position B1-B2. Avstånden är följande: B1 = 1.1 meter och B2 = 2.2 meter.



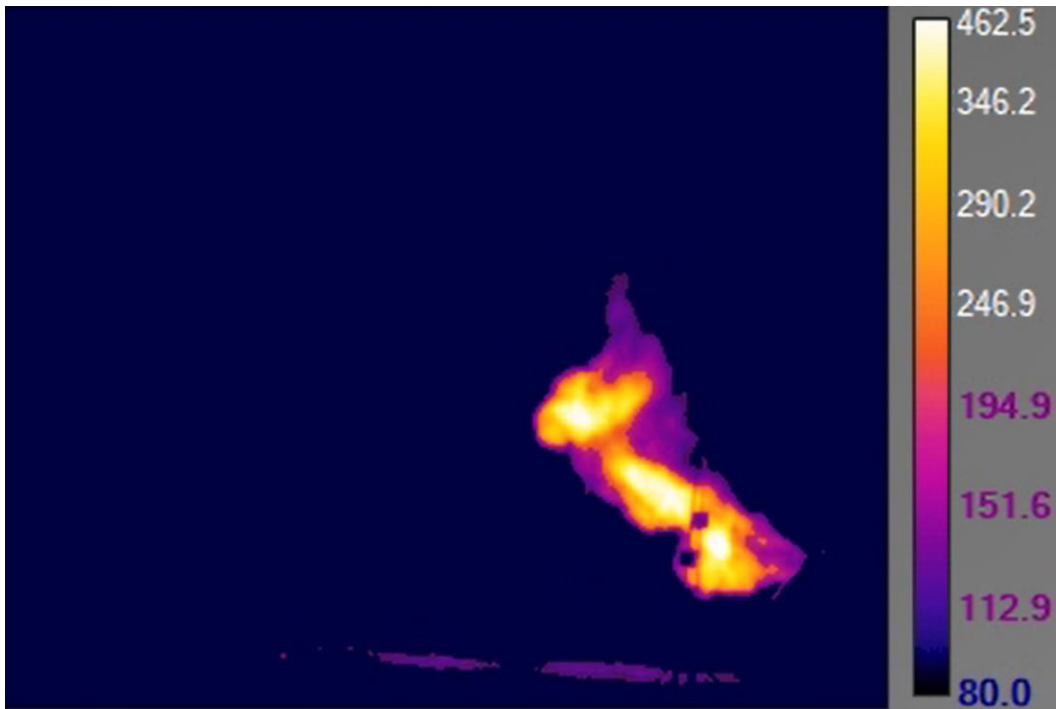
Figur 33. Test 4, uppmätta värmefflödesnivåer med värmefflödesmätare vid position A1 - A3 på 0.85 meter höjd.

## 4.5 Test 5

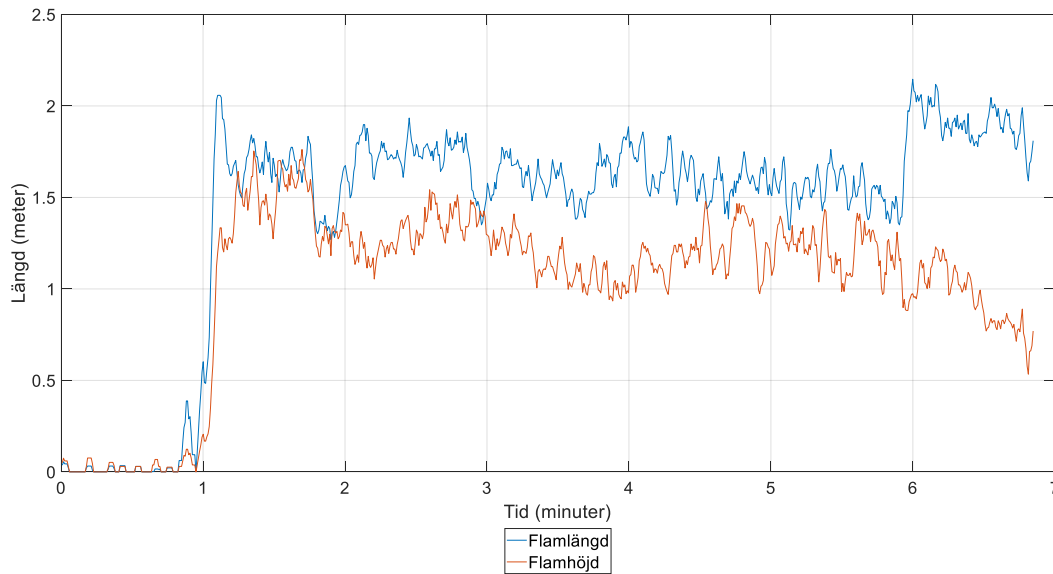
Test 5 var ett litet läckage med ett cirkulärt hål på en area på 1.77 mm<sup>2</sup> vilket gav en flamlängd på 1.75 meter och en flammhöjd på 1.25 meter. Test 5 simulerade stationära förhållanden och hade därför en total läckagetid på över 5 minuter. Det operativa trycket låg på ca 8 bar och en temperatur som spikar på ca 22 °C för att sedan stabiliseras på ca 15 grader i 5 minuter, tryck och temperatur för test 5 visas i Figur 37. Den karakteristiska flammen, visas i RGB format i Figur 34 och från värmekamera i Figur 35 och var minst av alla tester. Flammans längd och höjd för hela test 5 visas i Figur 36.



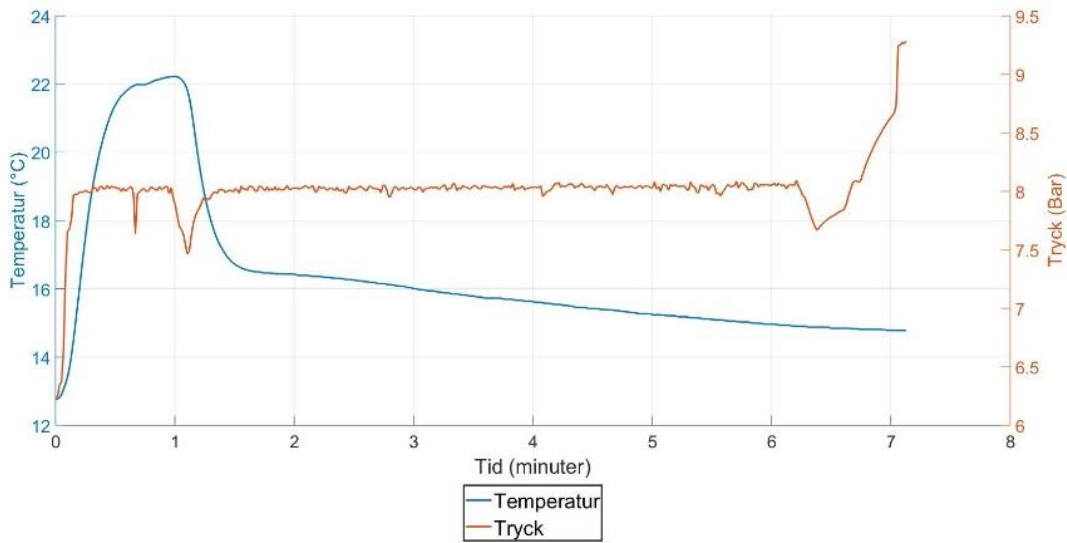
Figur 34. Karakteristisk flamma för test 5



Figur 35. Värmekamerabild för test 5



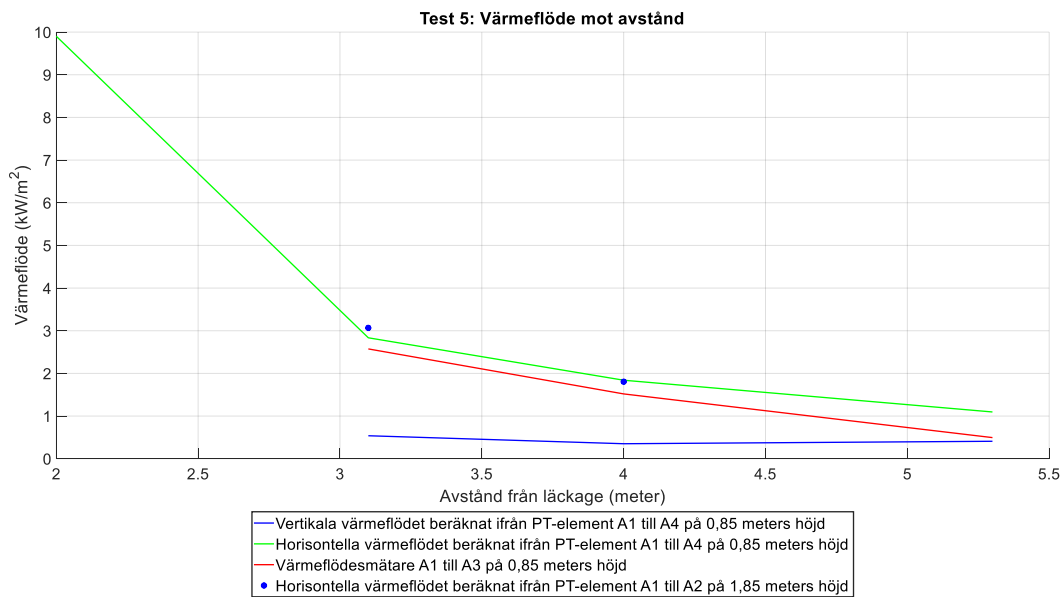
Figur 36. Flamlängd och höjd för test 5



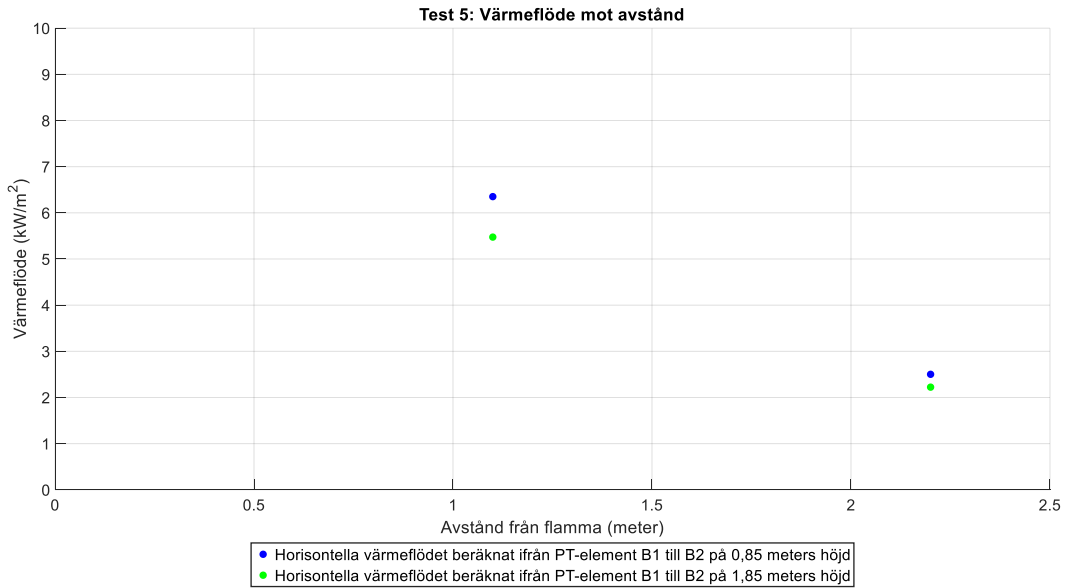
Figur 37. Bränslets tryck och temperatur i röret för test 5.

#### 4.5.1 Test 5 värmeflöden

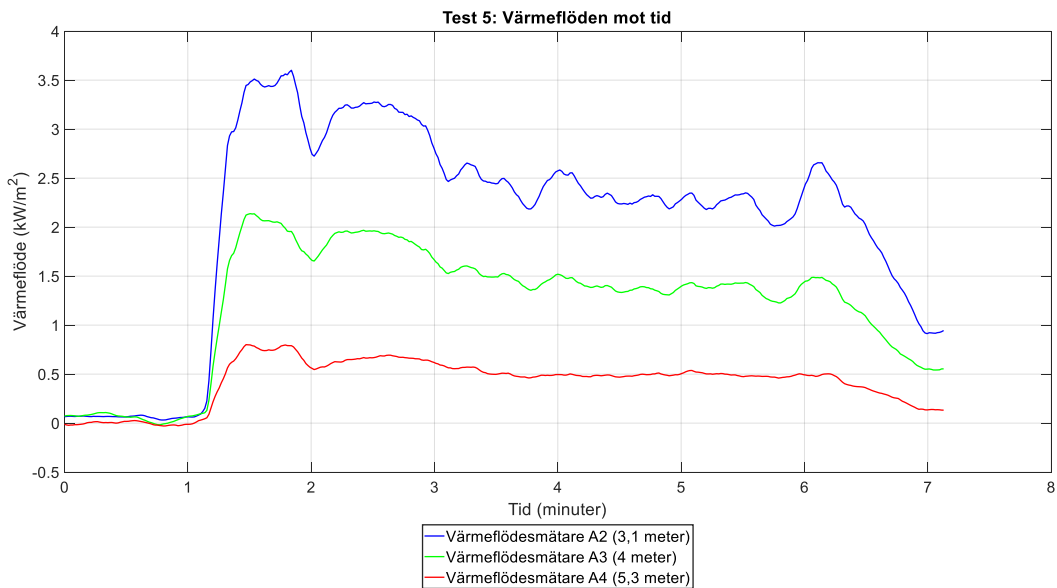
Test 5 var ett litet läckage och därmed så flyttades alla mätpositioner närmare enligt Tabell 3. Värmeflödet under test 5 var som högst vid position A1, närmast läckaget, på 0.85 meters höjd. Under stationära förhållanden låg värmeflödet runt 7.5 - 10 kW/m<sup>2</sup> med en spik på 15 kW/m<sup>2</sup> i början på testet. Värmeflödet sjönk från 7.5 - 10 kW/m<sup>2</sup> vid 2 meters avstånd, till 25 kW/m<sup>2</sup> vid 3.1 meters avstånd och var under 1.5 kW/m<sup>2</sup> efter 5.3 meter, vilket visas i Figur 38. Det beräknade värmeflödet ifrån PT vid B1 på 1.1 och 1.85 m höjd samt B2 på 0.85 och 1.85 meters höjd visas i Figur 39. Värmeflöden över tid uppmätta med värmeflödesmätare visas i Figur 40 och samtliga beräknade värmeflöden i position A visas i Figur 41.



Figur 38. Test 5, värmeflödet på vid position A1 till A4 efter 3 minuters test tid. Avstånden är följande: A1 = 2 meter, A2 = 3.1 meter, A3 = 4 meter och A4 = 5.3 meter

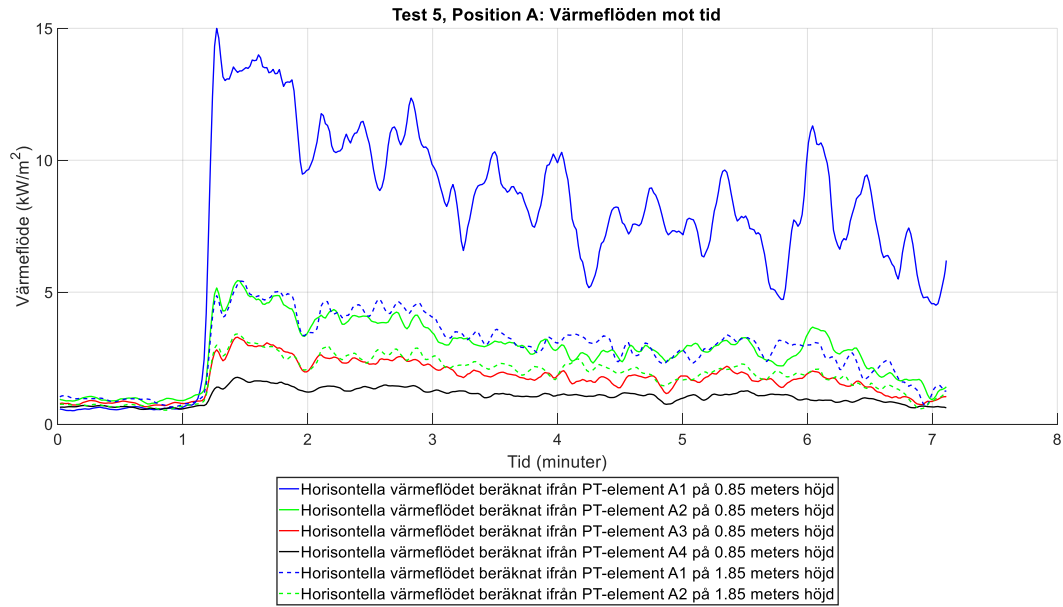


Figur 39. Test 5, värmefflödet på vid position B1 till A2 efter 3 minuters testtid. Avstånden är följande: B1 = 1.1 meter och B2 = 2.2 meter.



Figur 40. Test 5, uppmätta värmefflödesnivåer med värmefflödesmätare vid position A1 - A3 på 0.85 meter höjd.





Figur 41. Test 5, beräknade värmeflödesnivåer med PT vid position A1 – A4 på 0.85 meter höjd. Avstånden är följande: A1 = 2 meter, A2 = 3.1 meter, A3 = 4 meter och A4 = 5.3 meter



## 5 Diskussion och Slutsats

I de mätpunkter där det finns 3 eller fler mätelelement så beräknas en trendlinje i form av  $\dot{q}''_{inc} = Qr^{-\alpha}$ . Om ett objekt befinner sig långt från en strålningskälla, eller om strålningskällan kan approximeras med en punktkälla, så avtar infallande strålning med  $\sim r^{-2}$ . I detta fall är vi dock förhållandevis nära källan och strålningen avtar då med en exponent något skild från 2. Exempelvis anpassas resultaten för Test 1 vid samma höjd som läckaget med  $\dot{q}''_{inc} = 1600r^{-2.7256}$ . Trendlinjen används för att beräkna avståndet till värmeflödesnivåerna 12,5, 15 samt 40 kW/m<sup>2</sup>. I de fall då bara 2 mätpunkter finns att tillgå så anges ett spann där värmeflödesnivåerna 12,5, 15 samt 40 kW/m<sup>2</sup> bör finnas.

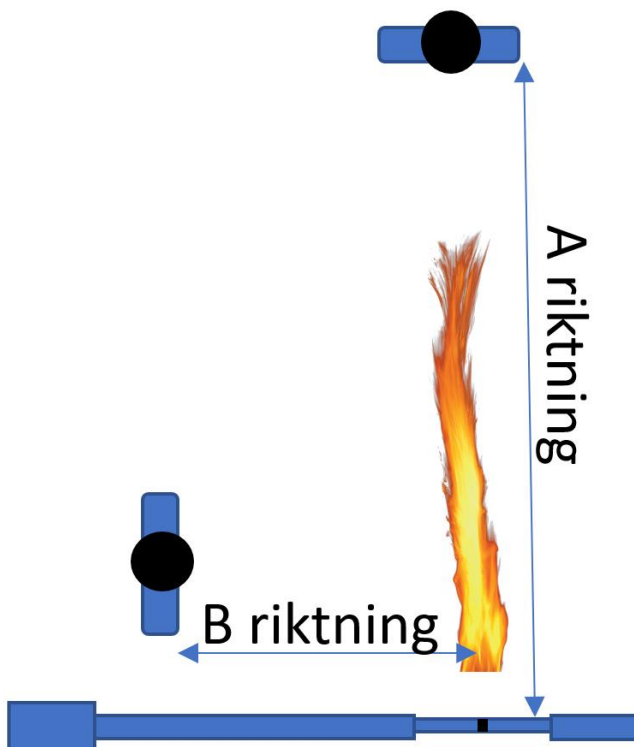
Teststycke 1, rör med en öppningslängd på 28 mm och en area på 34 mm<sup>2</sup> gav ett avstånd på 6 meter för 0.85 meter över marken respektive 7 meter 1.85 meter över marken för att undvika att utsättas för mer värmeflöde än 12,5 kW/m<sup>2</sup> i flammans riktning.

Teststycke 2, textilarmerad slang med 6 hål på en area om 29 mm<sup>2</sup> gav ett avstånd på 8 meter för 0.85 över marken och 9 meter 1.85 meter över marken för att undvika att utsättas för mer värmeflöde än 12,5 kW/m<sup>2</sup> i flammans riktning.

Teststycke 3, rör med ett hål på 1.77 mm<sup>2</sup> gav ett avstånd på <2 meter för 0.85 och 1.85 meter över marken för att undvika att utsättas för mer än 12,5 kW/m<sup>2</sup> i flammans riktning.

### 5.1 Sammanställda data

All data ifrån resultatet presenteras i Tabell 4 och de riktningar som används visualiseras i Figur 42.



Figur 42. Visualisering av A- och B-avstånd.

Tabell 4. Sammanställda data, avstånd för värmeflödena 12.5, 15 och 40 kW/m<sup>2</sup>. A och B avstånd visas i Figur 42.

Värmeflöden för stationärt läckage	Teststycke Nr 1 Rör, stort läckage	Teststycke Nr 2 Slang, stort läckage	Teststycke Nr 3 Rör, litet läckage
12.5 kW/m <sup>2</sup>			
A-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	6 meter	8 meter	<2 meter
A-riktning. Höjd: En meter över läckaget	7 meter	9 meter <sup>1,3</sup>	<2 meter
B-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	(-) <sup>2</sup>	(-) <sup>2</sup>	<1 meter
B-riktning. Höjd: En meter över med läckaget	(-) <sup>2</sup>	(-) <sup>2</sup>	<1 meter
15 kW/m <sup>2</sup>			
A-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	6 meter	7.5 meter	<2 meter
A-riktning. Höjd: En meter över läckaget	6.5 meter	9 meter <sup>1,3</sup>	<2 meter
B-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	(-) <sup>2</sup>	(-) <sup>2</sup>	<1 meter
B-riktning. Höjd: En meter över med läckaget	(-) <sup>2</sup>	(-) <sup>2</sup>	<1 meter
40 kW/m <sup>2</sup>			
A-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	<4 meter <sup>1</sup>	5.5 meter <sup>1</sup>	<2 meter
A-riktning. Höjd: En meter över läckaget	<5 meter <sup>1</sup>	6.1 meter <sup>1</sup>	<2 meter
B-riktning. Höjd: I höjd med läckaget	1 meter	<2.2 meter	<1.1 meter
B-riktning. Höjd: En meter över med läckaget	3 meter	<3 meter	<1.1 meter
Flamstorlek under stationära förhållande			
Längd	Medel: 3.72 meter Spridning: 0.18 meter	Medel: 5.58 meter Spridning: 0.19 meter	Medel: 1.61 meter Spridning: 0.13 meter
Höjd	Medel: 3.67 meter Spridning: 0.13 meter	Medel: 3.79 meter Spridning: 0.08 meter	Medel: 1.21 meter Spridning: 0.14 meter

<sup>1</sup>Beräknat med trendlinje  $\dot{q}_{inc}'' = Qr^{-\alpha}$  som är framtagen ifrån mätpunkter A1-A4. För test 1: vid 0 m över läckaget och för Test 3:  $\dot{q}_{inc}'' = 5045r^{-2.9753}$ .

<sup>2</sup> Ligger utanför de gränser som två mätpunkter ger.

<sup>3</sup> Beräknat konservativt utifrån förhållandet mellan 0.85 och 1.85 meter.



Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB  
Box 857, 501 15 BORÅS  
Telefon: 010-516 50 00  
E-post: [info@ri.se](mailto:info@ri.se), Internet: [www.ri.se](http://www.ri.se)

Safety  
RISE Rapport 2019:89  
ISBN: