

# **Applicering av befintliga handberäkningsmetoder på tidsberoende brandförlopp - En experimentell studie**

*Oscar Karlsson & Patrik Kjellberg*

---

**Division of Fire Safety Engineering  
Lund University, Sweden**

**Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet**

**Report 5508, Lund 2016**



**Applicering av befintliga handberäkningsmetoder  
på tidsberoende brandförlopp  
- En experimentell studie**

**Oscar Karlsson & Patrik Kjellberg**

**Lund 2016**

Applicering av befintliga handberäkningsmetoder på tidsberoende brandförlopp  
– En experimentell studie

Applying existing hand calculation methods on transient fires  
– An experimental study

Oscar Karlsson & Patrik Kjellberg

**Report 5508**

**ISRN: LUTVDG/TVBB-5508-SE**

Number of pages: 50 (exklusive bilagor)

Illustrations: Oscar Karlsson & Patrik Kjellberg

Keywords

Hand calculation methods, CFD, FDS, experiments, two-zone, data reduction, hot gas layer, HGL, heat transfer coefficient

Sökord

Handberäkningsmetoder, CFD, FDS, experiment, två-zon, datareducering, brandgaslager, värmeövergångstal

Abstract

The aim of this study is to investigate whether simple hand calculation methods are useful complements to CFD-simulations while calculating the temperature and height of the hot gas layer for transient fires. The analysis is based on evaluations of results from experiments, CFD-simulations and hand calculation methods. The room used corresponds to a 1/4th scale ISO 9705 room. The results show that hand calculation methods can be useful tools for calculations on transient fires. However, the results strongly depend on how the methods are used and how the parameters included are handled. The heat transfer coefficient was identified as a very important parameter. It is also difficult to predict, especially for walls consisting of several different materials. An alternative method for predicting the heat transfer coefficient for such walls is presented in this report.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2016.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)

Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering  
Faculty of Engineering  
Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund  
Sweden

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)

Telephone: +46 46 222 73 60

## Förord

Efter en enormt lärorik höst kan vi nu presentera slutprodukten av vårt examensarbete på Brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola. Längs arbetets gång har många hinder påträffats och passerats. Efter ohälsosamt många timmar tillsammans i laborationssalen och på kontoret är författarna fortfarande goda vänner. Detta ses som en stor seger i sig.

Författarna vill tacka följande personer:

Nils Johansson

Biträdande universitetslektor vid Avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola, för mycket bra handledning. Våra frågor har varit många men vi har alltid fått snabba och hjälpsamma svar. Tack vare dig har vi ett examensarbete som vi är stolta över.

Stefan Svensson

Universitetslektor vid Avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola, för all hjälp vid arbetets experimentella delar.

Franz Evegren och Ulf Wickström

Författare till artikeln *New approach to estimate temperatures in pre-flashover fires: Lumped heat case*. För att ni delade med er av forskningsresultat och kunskap inom ämnet.

Martin Persson

Brandingenjörsstudent vid Lunds Tekniska Högskola för hjälp vid isolering av brandrummet och bra diskussioner om värmetransport.

Kontorsgrannar på Fysikum

För trevliga fikapauser som gav bra avbrott i de annars långa dagarna på kontoret.



## Sammanfattning

Vid dimensionering av brandskydd är beräkning av brandgaslagrets temperatur och höjd vanligt då tid till kritiska förhållanden för människor ska bestämmas. Detta görs ofta med CFD-simuleringar som är ett kraftfullt men tidskrävande verktyg. Arbetets syfte är att undersöka om handberäkningsmetoder kan vara ett användbart verktyg för att komplettera CFD-simuleringar vid beräkningar på tidsberoende brandförlopp.

Analysen i detta arbete genomfördes genom att jämföra resultat från handberäkningar med resultat från experiment och CFD-simuleringar med programmet FDS. Alla moment genomfördes för ett rum som överensstämmer med ISO 9705-rummet i skalan 1:4.

Analysen visar att de undersökta handberäkningsmetoderna kan vara ett bra verktyg vid beräkningar på tidsberoende brandförlopp. Resultaten är dock väldigt beroende av hur metoderna används och hur de ingående parametrarna hanteras.

Vid handberäkning med de i arbetet undersökta metoderna bör användaren:

- Ha en stor förståelse för metodernas begränsningar och ingående parametrars påverkan på resultatet. Känslighetsanalyser kan vara bra verktyg för att få denna djupare förståelse.
- Ansätta värmeövergångstalet på ett sätt som representerar verkligheten då denna parameter har stor inverkan på temperaturuppskattningar. En alternativ metod för att uppskatta värmeövergångstalet för väggar uppbyggda av flera material har presenterats i rapporten.
- Primärt använda handberäkningar för att identifiera trender då en parameters påverkan analyseras i ett undersökt utrymme eller då approximativa resultat är tillräckliga.





## Summary

The temperature and height of the hot gas layer are important parameters while evaluating fire safety in buildings. These parameters are often calculated by performing CFD-simulations, which is a powerful but time consuming tool. The aim of this study is to investigate whether simple hand calculation methods are a useful complement to CFD-simulations while calculating the temperature and height of the hot gas layer for transient fires.

The study is based on evaluations of results from experiments, CFD-simulations and hand calculation methods. The room used in this analysis corresponds to a 1/4th scale ISO 9705 room.

The results show that hand calculation methods can be useful tools for calculations on transient fires. However the results strongly depend on how the methods are used and how the parameters included are handled.

While performing calculations with the studied methods the user should:

- Have a great understanding of the limitations of the methods and how different parameters affect the results. Sensitivity analysis is a recommended tool to gain understanding of different parameters impact on the results.
- Take great consideration into how the heat transfer coefficient is represented since this parameter greatly affects the results. An alternative method for predicting the heat transfer coefficient for walls consisting of several different materials is presented in this report.
- Primarily use the hand calculation methods while investigating how changing different parameters affects the results or when approximate results are sufficient enough.

## Nomenklatur

$A$	Area [ $\text{m}^2$ ]
$A_0$	Area på öppning [ $\text{m}^2$ ]
$A_t$	Arean i rummet som har kontakt med brandgaslagret [ $\text{m}^2$ ]
$A_T$	Rummets totala omslutningsarea (exklusive arean på öppningar) [ $\text{m}^2$ ]
$c_p$	Värmekapacitet [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$c_w$	Värmekapaciteten hos väggmaterialet [ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$D$	Ekvivalent bränslediameter [m]
$D^*$	Karaktäristisk branddiameter [m]
$g$	Gravitationskonstanten [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
$H$	Höjd till tak [m]
$H_0$	Höjd på öppning [m]
$h_k$	Värmeövergångstalet [ $\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ]
$\Delta H_c$	Förbränningsvärme [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]
$I$	Integral
$k$	Värmeledningsförmåga [ $\text{kW}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
$L_f$	Flamhöjd [m]
$\dot{m}''$	Massavbrinningen per kvadratmeter [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
$\dot{m}_g$	Massflödet varm gas ut genom öppningen [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
$\dot{m}_p$	Massflödet i plymen [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
$n$	Ett godtyckligt tal [-]
$\dot{Q}$	Effektutveckling [kW]
$\dot{Q}^*$	Dimensionslös effektutveckling [-]
$\dot{Q}_c$	Konvektiva delen av effektutvecklingen [kW]
$\dot{Q}_{Max}$	Maximala effektutvecklingen [kW]
$\dot{q}_{loss}$	Energiförlust från brandgaslagret till utrymmets gränser [kW]
$T$	Temperatur [K]
$T_l$	Temperaturen i det lägre lagret vid ett två-zons-antagande [K]
$T_u$	Temperaturen i det övre lagret vid ett två-zons-antagande [K]
$T_\infty$	Omgivningstemperatur [K]
$T_g$	Temperaturen i brandgaslagret [K]
$t$	Tid [s]
$t_e$	Exponeringstid [s]
$t_p$	Termisk penetrationstid [s]
$V_g$	Hastigheten på brandgaserna [m/s]
$z$	Höjd över golvet [m]
$z_{int}$	Brandgaslagrets höjd över golvet [m]
$\alpha$	Tillväxthastighet [ $\text{kW}/\text{s}^2$ ]
$\delta$	Tjocklek på väggen [m]
$\delta x$	Sidolängden på en cell i FDS [m]
$\rho_g$	Densiteten på brandgaserna [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_w$	Densiteten på väggen [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_\infty$	Densiteten på den omgivande luften [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\chi$	Förbränningseffektivitet [-]

## Akronymer

CFD	Computational Fluid Dynamics
CSV	Comma Separated Values
FDS	Fire Dynamics Simulator
HGL	Hot Gas Layer
ISO	International Standards Organisation
MQH	McCaffrey, Quintiere och Harkleroad
NIST	National Institute of Standards and Technology
SMV	Smokeview



# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte .....	1
1.3	Mål .....	1
1.4	Frågeställningar.....	1
1.5	Övergripande metod.....	2
1.6	Avgränsningar .....	2
2	Teori.....	3
2.1	Handberäkningsmetoder – Temperatur.....	3
2.1.1	McCaffrey, Quintiere och Harkleroad (MQH) .....	3
2.1.2	Johansson, Svensson och van Hees.....	4
2.2	Handberäkningsmetoder – Brandgaslagrets höjd.....	5
2.2.1	Yamana och Tanaka.....	5
2.2.2	Johansson, Svensson och van Hees.....	6
2.3	CFD och FDS.....	7
2.4	Datareducering .....	8
3	Metod .....	9
3.1	Litteraturstudie .....	10
3.2	Experimenten .....	10
3.2.1	Försöksuppställning .....	10
3.2.2	Genomförande.....	14
3.2.3	Utdatahantering.....	16
3.3	Handberäkningar – Temperatur .....	18
3.3.1	McCaffrey, Quintiere och Harkleroad (MQH) .....	20
3.3.2	Johansson, Svensson och van Hees.....	20
3.4	Handberäkningar – Brandgaslagrets höjd .....	21
3.4.1	Yamana och Tanaka.....	21
3.4.2	Johansson, Svensson och van Hees kombinerad med Yamana och Tanaka .....	21
3.5	FDS-simulering.....	21
3.6	Jämförelse av data.....	23
4	Resultat .....	25
4.1	Försöksuppställning 1 – långsam brand, stor öppning, oisolerad .....	25
4.2	Försöksuppställning 2 – snabb brand, stor öppning, oisolerad .....	27
4.3	Försöksuppställning 3 – långsam brand, liten öppning, oisolerad .....	28

4.4	Försöksuppställning 4 – snabb brand, liten öppning, oisolerad .....	30
4.5	Försöksuppställning 5 – långsam brand, liten öppning, isolerad .....	31
4.6	Försöksuppställning 6 – snabb brand, liten öppning, isolerad .....	33
4.7	Försöksuppställning 7 – långsam brand, stor öppning, isolerad .....	34
4.8	Försöksuppställning 8 – snabb brand, stor öppning, isolerad .....	36
5	Diskussion.....	39
5.1	Experimenten .....	39
5.2	FDS-simulering.....	40
5.3	Handberäkning .....	41
5.3.1	Allmänt .....	41
5.3.2	MQH .....	41
5.3.3	Johansson et al. ....	42
5.3.4	Yamana och Tanaka.....	42
5.4	Jämförelse .....	42
5.4.1	Brandgaslagrets höjd.....	42
5.4.2	Brandgaslagrets temperatur.....	43
5.4.3	Olika metoder för att uppskatta värmeövergångstalet.....	44
5.5	Allmänt .....	45
5.6	Framtida studier .....	45
6	Slutsatser .....	47
	Referenser .....	49
	Bilaga A FDS-simuleringar.....	51
A.1	Nodkonvergens .....	51
A.2	Indata FDS .....	52
A.2.1	Fullständig indatafil .....	52
A.2.2	Variationer i indata.....	57
A.3	Brandgaslagrets utseende beroende på öppningshöjd.....	58
	Bilaga B Beräkning av $\alpha$ -värde för Yamana och Tanaka.....	61
	Bilaga C Resultat experiment.....	65
C.1	Försöksuppställning 1 – långsam brand, stor öppning, oisolerad .....	65
C.2	Försöksuppställning 2 – snabb brand, stor öppning, oisolerad .....	67
C.3	Försöksuppställning 3 – långsam brand, liten öppning, oisolerad .....	68
C.4	Försöksuppställning 4 – snabb brand, liten öppning, oisolerad .....	70
C.5	Försöksuppställning 5 – långsam brand, liten öppning, isolerad .....	71
C.6	Försöksuppställning 6 – snabb brand, liten öppning, isolerad .....	73

C.7	Försöksuppställning 7 – långsam brand, stor öppning, isolerad .....	74
C.8	Försöksuppställning 8 – snabb brand, stor öppning, isolerad .....	76
C.9	Variationer mellan försök .....	77
C.9.1	Långsam brand (Försöksuppställning 1).....	77
C.9.2	Snabb brand (Försöksuppställning 8).....	80
Bilaga D	Olika metoder för att uppskatta värmeövergångstalet.....	83
Bilaga E	Resultatjämförelse isolering, öppning och bränsle .....	89
E.1	Isolering .....	89
E.1.1	Långsam brand, stor öppning.....	89
E.1.2	Snabb brand, stor öppning .....	91
E.1.3	Långsam brand, liten öppning.....	93
E.1.4	Snabb brand, liten öppning .....	95
E.2	Öppningshöjd.....	97
E.2.1	Oisolerad, långsam brand.....	97
E.2.2	Oisolerad, snabb brand.....	99
E.2.3	Isolerad, långsam brand .....	101
E.2.4	Isolerad, snabb brand .....	103
E.3	Bränsleuppställning.....	105
E.3.1	Oisolerad, stor öppning .....	105
E.3.2	Oisolerad, liten öppning.....	107
E.3.3	Isolerad, liten öppning.....	109
E.3.4	Isolerad, stor öppning.....	111
Bilaga F	Anteckningar från genomförda försök .....	113





# 1 Inledning

Syftet med inledningskapitlet är att ge en bakgrund till varför detta examensarbete genomförts och även presentera syftet, målet och frågeställningarna som ligger till grund för analysen.

## 1.1 Bakgrund

För att dimensionera ett skäligt brandskydd, så som lagen om skydd mot olyckor kräver (SFS 2003:778, 2003), är det många gånger viktigt att bestämma tiden till dess att farliga förhållanden för människor uppstår vid en rumsbrand (Boverket, 2006). För att göra detta används ofta simuleringar i två-zonsmodeller eller CFD-program. Sådana simuleringar kan ge bra, relevanta approximationer av förloppet med tydliga lättöverskådliga bilder om de används på rätt sätt. Det kan dock vara tidskrävande att sätta upp och köra sådana datorsimuleringar och det kan ta dagar innan ett resultat erhålls. På grund av detta finns det trots de välutvecklade datormodellerna ett stort intresse för snabba approximativa handberäkningsmodeller inom brandingenjörbranschen. Med sådana handberäkningsmodeller kan ett snabbt ungefärligt resultat erhållas för viktiga parametrar så som brandgaslagrets temperatur och höjd.

De flesta handberäkningsmetoder för brandingenjörssyften har utvecklats för bränder med konstant effektutveckling. Detta blir ett problem när metoderna ska appliceras på verkliga bränder eftersom bränder sällan har en konstant effektutveckling. Bränder i byggnader växer oftast i storlek tills de når övertändning eller blir ventilationskontrollerade (Karlsson & Quintiere, 1999). I brandtekniska analyser är tidsaspekten ofta viktig då jämförelser mellan tid till kritiska förhållanden och tid för utrymning är vanligt. Av denna anledning är det intressant att undersöka huruvida handberäkningsmetoder kan vara applicerbara även på tidsberoende brandförlopp.

## 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka hur väl befintliga handberäkningsmetoder förutspår temperatur och höjd för brandgaslagret i ett rum då de appliceras på tidsberoende brandförlopp. Detta genomförs genom att jämföra handberäkningar med experiment och CFD-simuleringar. Syftet är också att studera hur resultatens giltighet påverkas av parametrar som öppningsstorlek, väggmaterial och brandens tillväxthastighet och maxeffekt.

## 1.3 Mål

Målet med arbetet är att fastställa huruvida handberäkningsmetoder kan vara ett bra verktyg för beräkningar även på tidsberoende brandförlopp och i så fall vilka metoder som är lämpliga samt deras begränsningar.

## 1.4 Frågeställningar

Utifrån bakgrunden och arbetets syfte och mål har ett antal frågeställningar formulerats.

- Vilka handberäkningsmetoder är lämpliga att använda för att förutsäga brandgaslagrets höjd och temperatur vid en rumsbrand?
- Vilka parametrar har stor påverkan på resultatet?
- Vad ska en användare tänka på då handberäkningsmetoder används för beräkningar av tidsberoende brandförlopp?
- Vad bör framtida forskning fokusera på för att utveckla metoderna ytterligare?

## **1.5 Övergripande metod**

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att få mer kunskap om befintliga handberäkningsmetoder. Därefter genomfördes experiment i ett nedskalat rum med syfte att efterlikna verkliga brandförlopp. Även datorsimuleringar genomfördes där försöksuppställningarna från experimenten simulerades. Resultaten från experiment, handberäkningar och datorsimuleringar jämfördes sedan för att svara på arbetets frågeställningar.

## **1.6 Avgränsningar**

Detta arbete fokuserar på tillväxtfasen av ett brandförlopp, alltså innan en eventuell övertändning sker. Denna avgränsning görs eftersom brandtekniska analyser ofta fokuserar på tiden till kritiska förhållanden för människor. När en övertändning skett har kritiska förhållanden redan uppstått.

Analysen genomförs på ett nedskalat rum. I verkligheten kommer handberäkningsmetoderna att appliceras på vanliga rumsstorlekar. Ingen analys av skalningens effekt på resultatet genomförs i detta arbete.

Endast en rumsgeometri med olika typer av väggar och öppningsstorlek undersöks i arbetet. Ingen analys har genomförts av hur geometrin påverkar resultatet.

## 2 Teori

Syftet med teorikapitlet är att ge en teoretisk bakgrund till de beräkningsmetoder och programvaror som använts i arbetet.

### 2.1 Handberäkningsmetoder – Temperatur

I följande avsnitt presenteras de handberäkningsmetoder för beräkning av temperaturen i brandgaslagret som undersökts i arbetet.

#### 2.1.1 McCaffrey, Quintiere och Harkleroad (MQH)

McCaffrey, Quintiere och Harkleroad har utvecklat en metod för uppskattning av brandgaslagrets temperatur vid en rumsbrand med konstant effekt (D. Walton & H. Thomas, 2002). Metoden är välciterad och därför avses den testas i detta arbete.

Metoden är en empiriskt framtagen modell som bygger på data från över 100 försöksbränder och följande uttryck för energibalans, se Ekvation 2.1 (D. Walton & H. Thomas, 2002).

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_\infty) + \dot{q}_{loss} \quad \text{Ekvation 2.1}$$

Den vänstra sidan av ekvationen ( $\dot{Q}$ ) representerar energin som tillförs brandgaslagret av branden och den högra sidan representerar brandgaslagrets energiförluster. Den första termen på högersidan är den energi som försvinner med brandgasen som lämnar utrymmet genom en öppning och den andra termen är energin som går förlorad till utrymmets gränser. Energibalansen bygger alltså på att energin i brandgaslagret är konstant och att lika mycket energi som tillförs också förloras på annat håll.

Energien som går förlorad till utrymmets gränser ( $\dot{q}_{loss}$ ) förs bort via bland annat strålning ut genom öppningar och uppvärmning av väggar. Den största energiförlusten sker dock genom att värme leds ut genom utrymmets väggar (Karlsson & Quintiere, 1999). På grund av svårigheterna med att beskriva alla de aktiva värmetransportprocesserna och på grund av att värmeledningen utgör den dominanta faktorn så görs en förenkling. Energin som går förlorad till utrymmets gränser approximeras av McCaffrey et. al. till att vara lika med energin som lämnar rummet genom värmeledning till väggarna (D. Walton & H. Thomas, 2002). Detta betyder att värmeförlusterna till utrymmets gränser kan beskrivas med följande uttryck för värmeledning till väggarna, se Ekvation 2.2.

$$\dot{q}_{loss} = h_k A_T (T_g - T_\infty) \quad \text{Ekvation 2.2}$$

Med hjälp av en tredje ekvation, utvecklad av Rockett, för massflödet varm gas ut ur en öppning samt data från över 100 experiment landade McCaffrey et. al. i följande uttryck för temperaturen i brandgaslagret, se Ekvation 2.3 (D. Walton & H. Thomas, 2002).

$$\Delta T_g = 480 \left( \frac{\dot{Q}}{\sqrt{g} c_p \rho_\infty T_\infty A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{2/3} \left( \frac{h_k A_T}{\sqrt{g} c_p \rho_\infty A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{-1/3} \quad \text{Ekvation 2.3}$$

Uppskattningen av värmeövergångstalet ( $h_k$ ) sker på två olika sätt beroende på om exponeringstiden är längre eller kortare än den termiska penetrationstiden ( $t_p$ ). Den termiska penetrationstiden beräknas med Ekvation 2.4.

$$t_p = \left( \frac{\rho_w c_w}{k} \right) \left( \frac{\delta}{2} \right)^2 \quad \text{Ekvation 2.4}$$

När exponeringstiden är större än den termiska penetrationstiden kan värmeövergångstalet bestämmas med hjälp av en *steady-state* approximation enligt Ekvation 2.5. När exponeringstiden är mindre än den termiska penetrationstiden används istället en approximation om ledning i ett halv-öändligt material enligt Ekvation 2.6 (D. Walton & H. Thomas, 2002).

$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad \text{när } t_e > t_p \quad \text{Ekvation 2.5}$$

$$h_k = \left( \frac{k\rho_w c_w}{t_e} \right)^{1/2} \quad \text{när } t_e \leq t_p \quad \text{Ekvation 2.6}$$

Då inte samma material används i väggar, golv och tak används Ekvation 2.7 för att beräkna ett viktat  $h_k$  som tar hänsyn till de olika materialens areaförhållanden. Om en yta består av olika lager av material, så används Ekvation 2.8 för att vikta  $h_k$  (Karlsson & Quintiere, 1999).

$$h_k = \frac{A_{Vägg}}{A_T} h_{k,Vägg} + \frac{A_{Golv}}{A_T} h_{k,Golv} + \frac{A_{Tak}}{A_T} h_{k,Tak} \quad \text{Ekvation 2.7}$$

$$h_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{k,i}}} \quad \text{Ekvation 2.8}$$

### 2.1.2 Johansson, Svensson och van Hees

I Johansson et al. (2015) presenteras två metoder för att beräkna temperaturen i brandgaslager vid konstant brandeffekt. Metoderna är framtagna för utrymmen med flera rum, men en av metoderna är även applicerbar för utrymmen med endast ett rum. Detta arbete avser att endast använda metoden i artikeln refererad till som metod 2. Den metoden baseras på principerna kring massa och energis bevarande och består av ett antal beräkningssteg som löses analytiskt.

Ett stort antagande i denna teoretiska modell är att temperaturfördelningen i utrymmet approximeras till två zoner. All energi som branden avger antas transporteras till brandgaslagret.

Beräkningsstegen, anpassade för endast ett rum, beskrivs nedan:

Först beräknas höjden på brandgaslagret ( $z_{int}$ ) genom att anta att massflödet i plymen ( $\dot{m}_p$ ) vid brandgaslagrets höjd är lika med massflödet som lämnar brandrummet ( $\dot{m}_g$ ), se Ekvation 2.9. Massflödet som lämnar brandrummet ( $\dot{m}_g$ ) beräknas med Ekvation 2.10. Massflödet i plymen kan beräknas med olika plymmodeller, men Johansson et al. anser att Ekvation 2.11 som är framtagen av G. Heskestad är lämplig för ändamålet.

$$\dot{m}_p = \dot{m}_g \quad \text{Ekvation 2.9}$$

$$\dot{m}_g = 0,68A_0H_0^{1/2}(1 - z_{int}/H_0) \quad \text{när } z_{int}/H_0 > 0,3 \quad \text{Ekvation 2.10}$$

$$\dot{m}_p = 0,0058\dot{Q}_C(z/L_f) \quad \text{Ekvation 2.11}$$

När brandgaslagrets höjd är känd, kan Ekvation 2.10 användas för att räkna ut massflödet som lämnar brandrummet ( $\dot{m}_g$ ).

För att beräkna temperaturökningen i brandgaslagret används Ekvation 2.12, som är en energibalans för brandrummet. Termen  $\dot{m}_g c_p$  avser värme som transporteras ut ur rummet av brandgaserna. Termen  $h_k A_t$  avser värme som transporteras in i väggarna från brandgaslagret.

$$\Delta T_1 = \frac{\dot{Q}}{(\dot{m}_g c_p + h_k A_t)} \quad \text{Ekvation 2.12}$$

Värmeövergångstalet bestäms med hjälp av Ekvation 2.13 då tiden är större än den termiska penetrationstiden och med hjälp av Ekvation 2.14 då tiden är mindre än den termiska penetrationstiden. Den termiska penetrationstiden bestäms med Ekvation 2.4.

$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad \text{när } t_e > t_p \quad \text{Ekvation 2.13}$$

$$h_k = \left( \frac{k \rho_w c_w}{\pi * t_e} \right)^{1/2} \quad \text{när } t_e \leq t_p \quad \text{Ekvation 2.14}$$

För att beräkna massflödet i plymen med Ekvation 2.11 behöver flammhöjden bestämmas. Detta kan göras med ett antal olika metoder, bland annat med Heskestads flammhöjdsekvation, Ekvation 2.15. Heskestads ekvation har också använts som exempel i Johansson (2015). Formeln är utvecklad för pölbränder (Drysdale, 2011).

$$L_f = 0,235 \dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad \text{Ekvation 2.15}$$

Branddiametern kan beräknas med hjälp av Ekvation 2.16 (Drysdale, 2011). Tabellerade värden för massavbrinring, förbränningsvärme och förbränningseffektivitet behövs för det aktuella bränslet.

$$\dot{Q} = \Delta H_c \dot{m} A \chi \quad \text{Ekvation 2.16}$$

I första beräkningssteget görs ett antagande om att massflödet från plymen vid brandgaslagrets höjd är lika med massflödet ut ur öppningen. Antagandet fungerar bra för ett brandrum i *steady-state* men blir problematiskt när metoden ska appliceras på ett tidsberoende brandförlopp. Detta antagande innebär att det enligt beräkningsmodellen uppstår ett massflöde ut ur rummet samtidigt som branden startar. För att ett massflöde ut ur rummet ska kunna uppstå måste brandgaslagret ha sjunkit under öppningens höjd. Metoden ger alltså ett brandgaslager vid öppningshöjden i rummet från sekund ett vilket inte är fysikaliskt korrekt.

## 2.2 Handberäkningsmetoder – Brandgaslagrets höjd

I följande avsnitt presenteras de handberäkningsmetoder för beräkning av brandgaslagrets höjd som använts i arbetet.

### 2.2.1 Yamana och Tanaka

En beräkningsmodell för att bestämma höjden på brandgaslagret i ett rum som inte ventileras från brandgaslagret har utvecklats av Yamana och Tanaka (Karlsson & Quintiere, 1999). Modellen kan ge ett svar på hur snabbt rökfyllnaden i rummet sker för fall där brandens effektutveckling inte är konstant. Detta bygger på ett antagande om att densiteten på gaserna kan anses vara homogen för hela brandgaslagret samt konstant över tid. Antagandet innebär att modellen fungerar bäst för fall där branden är liten i förhållande till utrymmet och brandgaslagret därför är relativt svalt (Karlsson & Quintiere, 1999).

Modellen ansätter brandgaslagret till en kontrollvolym och använder en massbalansekvation enligt Ekvation 2.17 där massflödet från plymen beskrivs av Zukoskis plymmodell, Ekvation 2.18. Zukoskis plymmodell är en svag plymmodell, vilket innebär att den fungerar bäst på höjder en bit ovanför brandkällan. Eftersom det inte sker någon ventilation av brandgaserna så blir massflödet från plymen lika med massökningen i kontrollvolymen. Modellen antar att öppningarnas storlek är tillräckliga för att ingen tryckupbyggnad ska ske i utrymmet (Karlsson & Quintiere, 1999).

$$\frac{d}{dt}(\rho_g V_g) = \dot{m}_p \quad \text{Ekvation 2.17}$$

$$\dot{m}_p = 0,21 \left( \frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} Z^{5/3} \quad \text{Ekvation 2.18}$$

Effektutvecklingen antas vara en funktion av tiden, se Ekvation 2.19. Variabeln  $n$  beskriver hur tidsberoende effektutvecklingen är. Exempel på det är:  $n = 0$  betyder att effektutvecklingen är konstant,  $n = 1$  betyder att effektutvecklingens tillväxt är linjär och  $n = 2$  betyder att effektutvecklingens tillväxt är kvadratisk (Karlsson & Quintiere, 1999).

$$\dot{Q} = \alpha t^n \quad \text{Ekvation 2.19}$$

Med hjälp av antagandet om en medeldensitet i brandgaslagret som är konstant för alla tider och effektutvecklingens tidsberoende kan Ekvation 2.20 härledas (Karlsson & Quintiere, 1999).

$$Z = \left( k \frac{\alpha^{1/3} 2t^{(1+n/3)}}{A_{Golv} n + 3} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad \text{Ekvation 2.20}$$

Där  $k$  är en konstant som kan beräknas med Ekvation 2.21

$$k = \frac{0,21}{\rho_g} \left( \frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right)^{1/3} \quad \text{Ekvation 2.21}$$

Om temperaturen i brandgaslagret är känd kan densiteten ( $\rho_g$ ) beräknas med Ekvation 2.22 (EPRI, NIST, NRC-RES, SAIC, 2007).

$$\rho_g = \frac{353}{T_g} \quad \text{Ekvation 2.22}$$

## 2.2.2 Johansson, Svensson och van Hees

Beräkningsmetodiken som presenteras i Johansson et al. (2015) ger både temperaturen i brandgaslagret (omgivningstemperaturen plus temperaturökningen) och brandgaslagrets höjd. Se Avsnitt 2.1.2 för teori och beräkningsmetodik.

## 2.3 CFD och FDS

För att förutspå fluiders beteenden i avgränsade volymer kan CFD-modeller användas. De kan även användas för att uppskatta temperatur och höjd på brandgaslager vilket gör dem användbara vid brandtekniska analyser. Dessa avancerade datormodeller kan beskriva flöden hos olika fluider genom att lösa ekvationer som baseras på de fysikaliska grundlagarna om bevarande av massa, energi och rörelsemängd. Dessa förenklas till lösbara ekvationer för avgränsade kontrolvolymer, så kallade Navier Stokes-ekvationer (Blazek, 2001). Den simulerade volymen delas upp till mindre volymer eller celler. Navier Stokes-ekvationerna löses sedan för varje cell i den simulerade volymen (Blazek, 2001). Undermodeller behandlar sedan de mer komplexa fenomenen som förekommer i mindre skala än cellerna, till exempel förbränning och turbulens. Modellerna använder sig av ett antal approximationer och förenklingar vilket innebär att inga exakta lösningar kan erhållas (Carlsson, 2003).

FDS är ett CFD-program som är framtaget för simulering av brandförlopp. Programmet är utvecklat av NIST och finns att tillgå gratis. FDS är inriktat på rök- och värmetransport och löser en version av Navier Stokes-ekvationerna som är anpassade för låga hastigheter med termisk drivning (McGrattan, et al., 2015).

En FDS-simulerings giltighet är starkt beroende av upplösningen på gridnätet, det vill säga cellernas storlek. Mindre celler ger bättre lösningar men är också mer tidskrävande. På grund av detta måste en avvägning göras vid varje simulering för att skapa en detaljeringsnivå på gridnätet som inte innebär en orimligt lång simuleringstid men som ändå ger ett relevant resultat. Som hjälpmedel för denna avvägning finns ett antal rekommendationer. Angående cellernas storlek finns rekommendationen att  $D^*/\delta x$  ska vara mellan 4 och 16, där  $D^*$  ges av Ekvation 2.23 och  $\delta x$  är cellernas sida i meter (McGrattan, et al., 2015).

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{(2/5)} \quad \text{Ekvation 2.23}$$

Det är också viktigt att själva branden representeras på ett realistiskt sätt i simuleringen. Bland annat måste brandytan vara rimligt stor i förhållande till den aktuella brandens effektutveckling. För att avgöra detta kan en dimensionslös effektutveckling beräknas enligt Ekvation 2.16 som bör vara mellan 0,3 och 2,5 för naturliga rumsbränder (Cox & Kumar, 2002).

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad \text{Ekvation 2.24}$$

För att simuleringen ska ge ett bra resultat är det också viktigt att en förlängning av beräkningsmodellens domän görs mellan domängränsen och öppningen till det simulerade utrymmet. Om det inte görs har programmet svårt att representera flödet ut genom öppningarna på ett korrekt sätt. Avståndet mellan öppningen och domängränsen ska vara minst  $0,5 \times$  den hydrauliska diametern för simuleringens största öppning. Den hydrauliska diametern kan beräknas med Ekvation 2.25 (BIV, 2013).

$$\text{Hydraulisk diameter} = \frac{4 * \text{Arean av öppningen}}{\text{Öppningens omkrets}} \quad \text{Ekvation 2.25}$$

En platt brand direkt på golvet kan innebära svårigheter vid simulering eftersom det kan ge upphov till orrealistiska flöden. Detta kan undvikas genom att branden höjs upp från golvet och istället läggs ovanpå till exempel en kub (BIV, 2013).

FDS är ett terminalbaserat program utan grafiskt gränssnitt. I en indatafil specificeras simuleringens alla olika parametrar. Det är till exempel var väggar är placerade, hur branden beter sig, vilka utdata som önskas. För att lättare skapa en indatafil kan programmet PyroSim användas (Thunderhead, 2015). PyroSim är ett grafiskt gränssnitt som underlättar uppbyggandet av indatafilen genom att bland annat visa geometrin visuellt medan den byggs upp.

När simuleringen är klar erhålls utdata dels som CSV-filer, men också som SMV-filer som är körbara i programmet Smokeview som inkluderas vid installationen av FDS. Smokeview är ett program som har utvecklats för att visualisera resultaten från brandsimuleringar i till exempel FDS (NIST, 2014). Med hjälp av Smokeview kan en bild på den simulerade geometrin genereras och brandförloppet blir överskådligt genom att olika viktiga parametrar kan visas.

Vid all simulering i detta arbete har FDS Version 6.2.0 (Revision: 22343) använts.

## 2.4 Datareducering

Beräkningsmetoderna som presenterats i Avsnitt 2.1 och 2.2 bygger på att brandrummet förenklas till en två-zonsmodell. Detta innebär att brandrummet delas in i två lager, ett övre lager med de varma brandgaserna och ett undre lager med omgivningsluft. Från handberäkningarna fås alltså endast en höjd på brandgaslagret och en temperatur som antas gälla i hela brandgaslagret. I CFD-simuleringar och experiment finns inte två tydliga lager och därför måste mätvärdena från flera mätpunkter reduceras till medeltemperaturer på brandgaslagret för att kunna jämföras med handberäkningar. Det finns flera metoder för att utföra en sådan reduktion av data. Datareduceringen i den här rapporten har genomförts med metoden som beskrivs i Fire Dynamics Simulator User's Guide (McGrattan, et al., 2015) och utgår från Ekvationerna 2.26 - 2.29 nedan. Metoden har tidigare använts i flera andra studier (Johansson, et al., 2015) (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007).

$$\int_0^H T(z) dz = I_1 \quad \text{Ekvation 2.26}$$

$$\int_0^H \frac{1}{T(z)} dz = I_2 \quad \text{Ekvation 2.27}$$

$$z_{int} = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H} \quad \text{Ekvation 2.28}$$

$$(H - z_{int})T_u = \int_{z_{int}}^H T(z) dz \quad \text{Ekvation 2.29}$$

Där  $T_l$  är temperaturen i det lägre lagret som ansätts till att vara lika med temperaturen i det lägsta termoelementet. Med hjälp av ekvationerna kan  $T_u$  (brandgaslagrets temperatur) och  $z_{int}$  (brandgaslagrets höjd) beräknas.



### 3 Metod

Syftet med metodkapitlet är att beskriva hur arbetet har utförts och presentera de metoder som använts i arbetets olika delar.

För att uppnå arbetets syfte och mål inleddes arbetet med en inventering av handberäkningsmetoder. Detta skedde genom en litteraturstudie där intressanta handberäkningsmetoder sorterades ut. De ingående parametrarna i metoderna studerades för att säkerställa att alla nödvändiga mätvärden kunde erhållas från experiment och simuleringar.

När handberäkningsmetoderna inventerats fastställdes ett antal försöksuppställningar som medgav att inverkan från parametrarna öppningshöjd, väggmaterial samt brandens tillväxthastighet och maxeffekt, som anges i arbetets syfte, kunde studeras var för sig. Dessa försöksuppställningar testades sedan med både experiment och simuleringar.

Innan experimenten inleddes riggades labbet så att utrustning fanns för att logga all nödvändig utdata. För detta arbete bedömdes temperaturen i brandgaslagret samt brandgaslagrets höjd vara den viktigaste informationen eftersom dessa parametrar ofta är intressanta ur ett brandskyddsperspektiv. Även annan data loggades för att underlätta kontroll av rimligheten i de erhållna värdena samt för att tillhandahålla intressant experimentdata för andra arbeten. För att kunna jämföra experimenten med handberäkningar och simuleringar var det också viktigt att mäta effektutvecklingen under försöken. När det säkerställdes att utdata loggades korrekt genomfördes experimenten och grafer över temperatur i brandgaslagret och brandgaslagrets höjd togs fram med hjälp av en metod för datareducering som beskrivits i Avsnitt 2.4.

Totalt utfördes 24 stycken försök med åtta olika försöksuppställningar och tre repetitioner av varje uppställning. För att jämföra med simuleringar och handberäkningar valdes ett av försöken per försöksuppställning ut som representativt för de två andra. På så sätt erhöles en effektkurva som kunde användas vid simuleringar och handberäkningar. Effektkurvor för alla försök redovisas i Bilaga C. I början av vissa försök registrerades små, negativa effekter. Dessa har vid vidare beräkningar satts till noll kilowatt.

FDS-simuleringar motsvarande de olika försöksuppställningarna sattes upp med hjälp av PyroSim. För att säkerställa att simuleringarna ger relevanta resultat användes de valideringsekvationer och rekommendationer som presenterats i Avsnitt 2.3. Punktmätningar av gastemperaturen placerades ut i simuleringarna på motsvarande platser där termoelement var placerade i experimenten. Brandgaslagrets höjd och temperatur kunde sedan beräknas med hjälp av samma reduceringsmetod som användes för experimenten.

Handberäkningar genomfördes med de metoder som presenterats i Avsnitt 2.1 och 2.2. Beräkningarna genomfördes genomgående i Microsoft Excel och utnyttjade effektkurvorna som erhållits från experimenten som indata.

När experiment, simuleringar och handberäkningar genomförts jämfördes resultaten grafiskt. Varje försöksuppställning analyserades separat och resultaten av analysen presenteras i Kapitel 4.

I nedanstående avsnitt presenteras metoden för arbetets olika delmoment mer ingående.

### 3.1 Litteraturstudie

Vid arbetets uppstart gjordes en litteraturstudie för att inventera befintliga handberäkningsmetoder som kan användas för att beräkna temperatur och höjd på brandgaslager. Inventeringen skedde med hjälp av välciterad litteratur på brandområdet, sökningar i relevanta databaser och diskussioner med handledare. Den litteratur som framförallt studerades var *Enclosure fire dynamics* (Karlsson & Quintiere, 1999), *An Introduction to Fire Dynamics* (Drysdale, 2011) och *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (SFPE, NFPA, 2002). Vid informationssökning i databaser användes framförallt databasen *Engineering Village* (Elsevier B.V., 2015).

Varje metods beräkningsgång och antaganden studerades ingående för att avgöra om den aktuella metoden var intressant för arbetet. De metoder som ansågs vara intressanta studerades vidare och beskrivs i Avsnitt 2.1 och 2.2.

### 3.2 Experimenten

Nedan följer mer information om hur experimenten i arbetet ställdes upp och utfördes. Totalt utfördes 24 stycken försök med åtta olika försöksuppställningar och tre repetitioner av varje uppställning. Samtliga försök utfördes i vid Lunds Tekniska Högskola, Figur 3.1 visar en översikt av laborationssalen som nyttjades.



Figur 3.1: Översikt av laborationssalen vid Lunds Tekniska Högskola som experimenten utfördes i.

#### 3.2.1 Försöksuppställning

I samtliga utförda försök har en fjärdedelsmodell av standardrummet ISO 9705 använts (SP Technical Research Institute of Sweden, 2015). Skalan på försöken bestämdes till en fjärdedel på grund av den utrustning och det material som fanns att tillgå. Brandgaser från större försök hade varit svårt att hantera med tillgänglig laborationsutrustning. Beroende på försök har rummets uppbyggnad varierats i form av öppningsstorlek och väggmaterial. I försök med stor öppning användes en öppning med bredden 0,3 meter och en höjd på 0,5 meter. Öppningen är tio centimeter bredare än en helt skalenlig modell. I försök med liten öppning sänktes öppningens höjd till 0,25 meter, det vill säga hälften av den stora öppningens höjd. Bredden på den lilla öppningen är samma som för den stora öppningen. Rummets geometri i övrigt presenteras i Tabell 3.1. Inför försöken med isolerade väggar monterades stenullsskivor på utsidan av väggarna och taket. Figur 3.2 visar rummets utseende utan respektive med isolering på väggarna.

Tabell 3.1: Brandrummets geometri samt de olika öppningsstorlekarna.

	Längd [m]	Bredd [m]	Höjd [m]
Rum	0,9	0,6	0,6
Stor Öppning	-	0,3	0,5
Liten Öppning	-	0,3	0,25



Figur 3.2: Det nedskalade modellrummet som användes vid försöken, till vänster utan isolering och till höger med isolering.

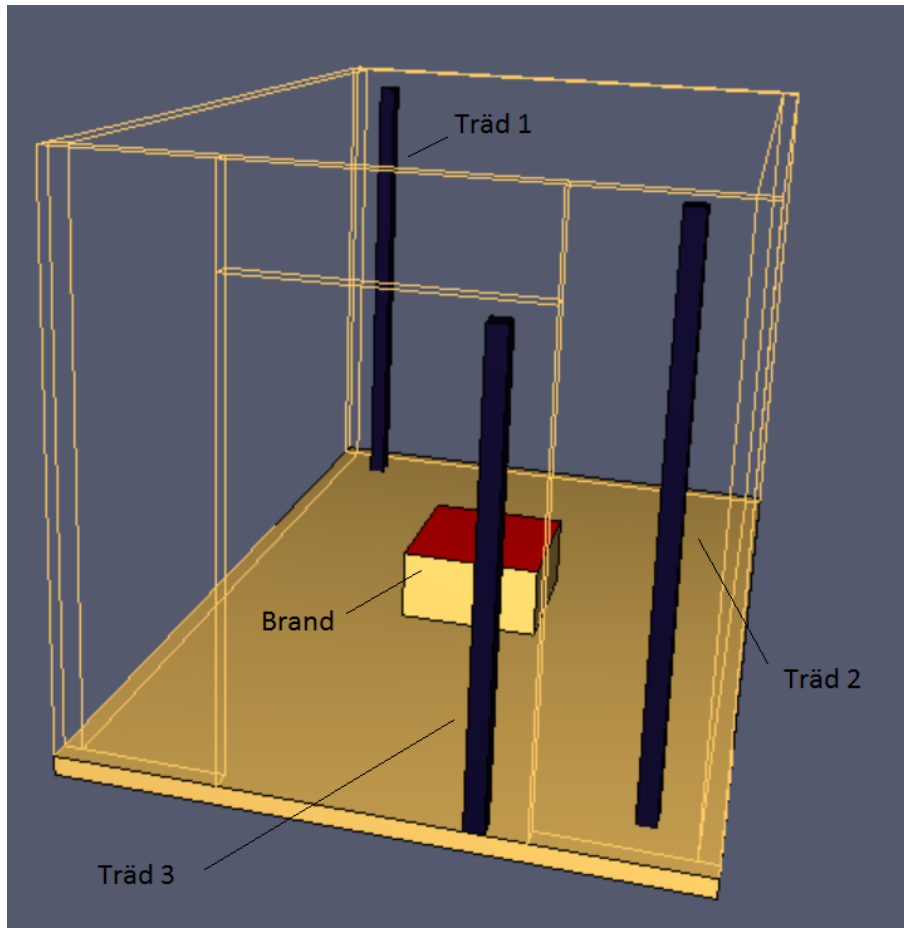
Rummets grunduppbyggnad bestod av tolv millimeter tjocka brandskyddsskivor som väggar. Taket och golvet bestod av dubbla skivor. Alla skarvar i hörn och mot golvet kontrollerades med jämna mellanrum för att undvika läckage av brandgaser. Vid de isolerade försöken användes 5 centimeter tjocka stenullsskivor som utvändig isolering. Dessa monterades med tejp så att de satt tätt mot väggarna och taket. Materialegenskaper för isoleringen och brandskyddsskivorna framgår i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Tabellerade materialegenskaper för brandrummets väggar och utvändiga isolering.

Materialegenskaper	Brandskyddsskivor <i>Promatect-H</i>	Stenull <i>Paroc GRS 30</i>
Tjocklek [m]	0,012	0,05
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	870 (Promat, 2013)	130 (PAROC, 2015)
Värmekonduktivitet [W/m·K]	0,175 (Promat, 2013)	0,037 (PAROC, 2015)
Värmekapacitet [J/kg·K]	1130 (Johansson, et al., 2015)	800 (PAROC, 2015)

Utdata från experimenten mättes med hjälp av termoelement och flödesmätare samt syrgasmätningar av brandgasen. Mätvärden från termoelementen och flödesmätarna loggades med en dataTaker DT85 series 2 ungefär varannan sekund och effektutvecklingen loggades var femte sekund med hjälp av en gasanalysator och datorprogrammet LSHRCalc.

Rummets uppställning framgår av Figur 3.3. Branden bestod av ett bål av träribbor och placerades i rummets mitt. Två stycken termoelementtråd monterades med nio termoelement i varje. Träden placerades ut i varsitt diagonalt motstående hörn. I öppningen placerades ytterligare ett träd med fyra eller sju termoelement beroende på höjden på öppningen. Träden placerades på ett sätt så att alla termoelement satt 5 centimeter från närmaste vägg/väggar.



Figur 3.3: Termoelementträdens placering i rummet. Alla termoelement är placerade på ett avstånd av 5 centimeter från närmaste vägg/väggar.

Termoelementträd monterades enligt Tabell 3.3. På termoelementträd 3 monterades även 4 stycken pitotrör. Beroende på öppningsstorleken i det aktuella försöket varierades placeringen på flödesmätarna och antalet termoelement i träd 3, även detta framgår i Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Namn och placering av termoelementen på de olika träden som använts i försöken. Termoelementen var av typ K med 0,21 millimeter tjocka trådar som svetsats ihop. \* = Ett pitotrör är placerat på samma position som aktuellt termoelement.

<b>Träd 1</b>		<b>Träd 2</b>		<b>Träd 3 (Stor öppning)</b>		<b>Träd 3 (Liten öppning)</b>	
Namn	Höjd [m]	Namn	Höjd [m]	Namn	Höjd [m]	Namn	Höjd [m]
THCP1_1	0,10	THCP2_1	0,10	THCP3_1	0,10	THCP3_4*	0,055
THCP1_2	0,16	THCP2_2	0,16	THCP3_2	0,16	THCP3_5*	0,10
THCP1_3	0,22	THCP2_3	0,22	THCP3_3	0,22	THCP3_6*	0,16
THCP1_4	0,28	THCP2_4	0,28	THCP3_4*	0,28	THCP3_7*	0,22
THCP1_5	0,34	THCP2_5	0,34	THCP3_5*	0,34		
THCP1_6	0,40	THCP2_6	0,40	THCP3_6*	0,40		
THCP1_7	0,46	THCP2_7	0,46	THCP3_7*	0,46		
THCP1_8	0,52	THCP2_8	0,52				
THCP1_9	0,58	THCP2_9	0,58				

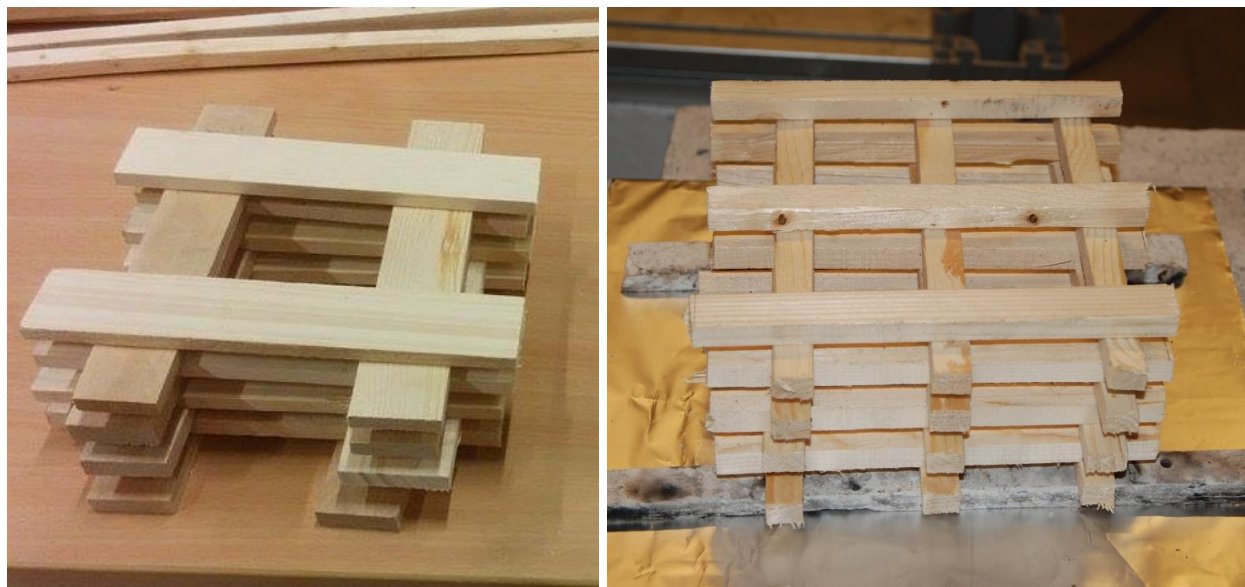
Eftersom experimentdata söktes till ett annat pågående examensarbete (Persson, 2015) angående värmeledning genom väggar placerades också termoelement på utsidan av rummets väggar. I de oisolerade försöken placerades tre termoelement ut. Ett av dessa placerades på takets mitt och de andra två på ena sidoväggen, tio centimeter respektive 50 centimeter från golvet. Under de isolerade försöken placerades ytterligare tre termoelement ut på motsvarande positioner utanför isoleringen. Resultat från dessa mätningar presenteras inte i denna rapport.

## Bränsle

För att kunna undersöka två olika tillväxthastigheter användes två olika konstruktioner av träribbstaplar. Träribbstapeln som gav den långsammare tillväxthastigheten bestod av platta, breda träribbor staplade med två ribbor i varje lager. Den snabbare bränsleuppställningen bestod av smala ribbor staplade med tre ribbor i varje lager. I den snabba träribbstapeln finns alltså 4 skorstenar. Bränslet antändes med hjälp av papper som lades vid båletts botten och T-sprit som droppades på papperet. Ungefär fyra kvadratdecimeter papper och 0,8 milliliter T-sprit användes vid varje antändning. Vid försöken placerades bålet på tolv millimeter tjocka lister av *Promatect-H* för att höjas upp något från golvet. De två träribbstaplarnas egenskaper och utseende framgår tydligare av Tabell 3.4 och Figur 3.4. För den snabbare bränsleuppställningen erhöles en högre maxeffekt än för den långsamma, se Bilaga C.

Tabell 3.4: Ingående parametrar för de två olika träribbstaplarna. Noggrannheten på vågen som användes var 50 gram.

	Antal träribbor	Antal lager	Höjd på bål [cm]	Bredd skorsten/-ar [cm]	Längd träribba [cm]	Bredd träribba [cm]	Höjd träribba [cm]	Uppmätt vikt för träribb- stapel [kg]
Långsam	16	8	7,5	7	20	3,5-4	0,7-1	0,5-0,55
Snabb	24	8	8	5	18	1,5±0,2	1±0,2	0,35



Figur 3.4: De två olika träribbstaplarnas utseende, långsam till vänster och snabb till höger. I den högra bilden syns även promatectlisterna som bålet placerades på för att höjas upp något från golvet. Alla träribbor förvarades i samma lokal minst två dygn innan försök genomfördes.

I Figur 3.5 visas de båda uppställningarna en stund efter antändning. Det är tydligt att brandförloppet påverkas av skorstenseffekten som uppstår på grund uppställningarnas konfiguration.



Figur 3.5: De två olika bränslekonfigurationerna en stund efter antändning.

### 3.2.2 Genomförande

Laborationerna genomfördes under cirka tre veckors tid i ett brandlaboratorium på Avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola. För att kunna undersöka hur de tre parametrarna öppningsstorlek, isolering samt brandens tillväxthastighet och maxeffekt påverkar resultatet skapades åtta olika försöksuppställningar, dessa visas i Tabell 3.5. Varje uppställning upprepades tre gånger för att undvika felkällor och för att påvisa repeterbarhet. Försöksuppställningarna varierades också mellan försöken så att inte till exempel försöksuppställning 1 kördes tre gånger i rad. Även detta för att undvika felkällor. Alla försök videodokumenterades.

Tabell 3.5: De åtta olika försöksuppställningarna som har undersökts. Stor öppning motsvarar en öppningshöjd på 0,5 meter och liten öppning motsvarar en öppningshöjd på 0,25 meter.

Försöksuppställning	Tillväxthastighet	Öppningsstorlek	Isolering
1	Långsam	Stor	Nej
2	Snabb	Stor	Nej
3	Långsam	Liten	Nej
4	Snabb	Liten	Nej
5	Långsam	Liten	Ja
6	Snabb	Liten	Ja
7	Långsam	Stor	Ja
8	Snabb	Stor	Ja

Ett typiskt brandförlopp för den snabba och långsamma bränslekonfigurationen redovisas i Figur 3.6 respektive Figur 3.7. Längst till vänster i figurerna visas en bild tagen strax efter antändning. I mitten visas en bild som är tagen när branden växt tillräckligt för att en skorstenseffekt ska uppstå. Denna effekt var tydlig under försöken. Bilderna till höger visar bränderna när de är fullt utvecklade.



Figur 3.6: Bilder över brandförloppet från ett försök med den snabba bränslekonfigurationen.



Figur 3.7: Bilder över brandförloppet från ett försök med den långsamma bränslekonfigurationen.

Vid alla försök bildades tydliga brandgaslager och höjden noterades när lagret stabiliserats. För försöksuppställningarna med stor öppning innebar höjduppskattningen ibland ett problem på grund av att inget tydligt gränsskikt till brandgaslagret bildades. För försöksuppställningarna med liten öppning bildades däremot ett väldigt tydligt gränsskikt så som redovisas i Figur 3.8. Övertändning observerades inte under något av försöken.



*Figur 3.8: Vid försök med liten öppning bildades ett tydligt brandgaslager. Vid försök med stora öppningar var gränsskiktet mindre skarpt.*

### 3.2.3 Utdatahantering

Utdata från experimenten togs med hjälp av termoelement, flödesmätare samt gasanalysator så som beskrivits i Avsnitt 3.2.1. Eftersom data på effektutvecklingen från gasanalysatorn inte loggades på samma instrument som termoelementen och flödesmätarna behövde dessa synkroniseras. Genom att synkronisera logganordningarna kunde data på till exempel effektutveckling och temperatur kopplas till en viss tid efter antändning. Synkroniseringen uppnåddes genom att en strömbrytare anslöts till en av kanalerna på logganordningen dataTaker DT85. En sluten strömkrets programmerades till att ge en etta i utdata-filen och en öppen krets programmerades till att ge en nolla. I datorprogrammet LSHRCalc, som användes för att logga effektutvecklingen, kunde tidpunkten för antändning noteras med ett knapptryck. Genom att slå till strömbrytaren och notera tiden för antändning i LSHRCalc samtidigt erhöles en starttid som är samma för både effektutvecklingen och gastemperaturen samt gasflödet ut ur öppningen.

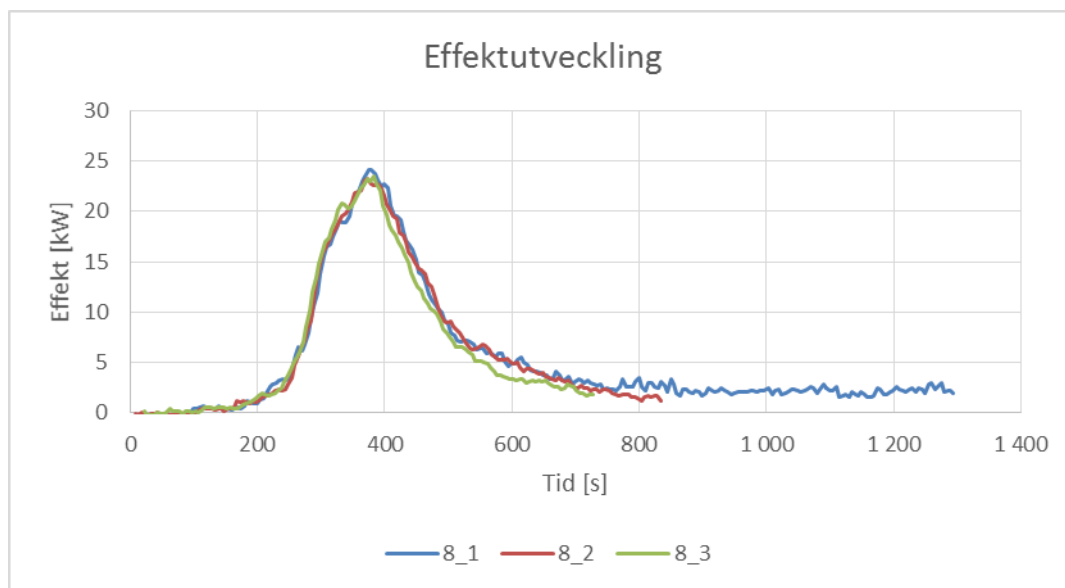
Rimligheten i erhållen utdata kontrollerades omedelbart efter att experimenten genomförts genom att till exempel titta på att de övre termoelementen i ett träd var de varmaste. Även rimligheten på utdata från flödesmätarna kontrollerades genom att titta på storleksordningen samt att gaserna hade en större hastighet längre upp i öppningen.

För att kontrollera repeterbarheten i försöken skapades diagram över effektutvecklingen från de tre försöken för varje uppställning. Då förbrinntiden varierade var det nödvändigt att förskjuta kurvorna för att underlätta jämförelse. Kurvorna försköts så att tillväxtfaserna matchade varandra så bra som möjligt. Samma kontroll gjordes för termoelementet 2\_5 och 2\_9. Detta redovisas i Bilaga C.

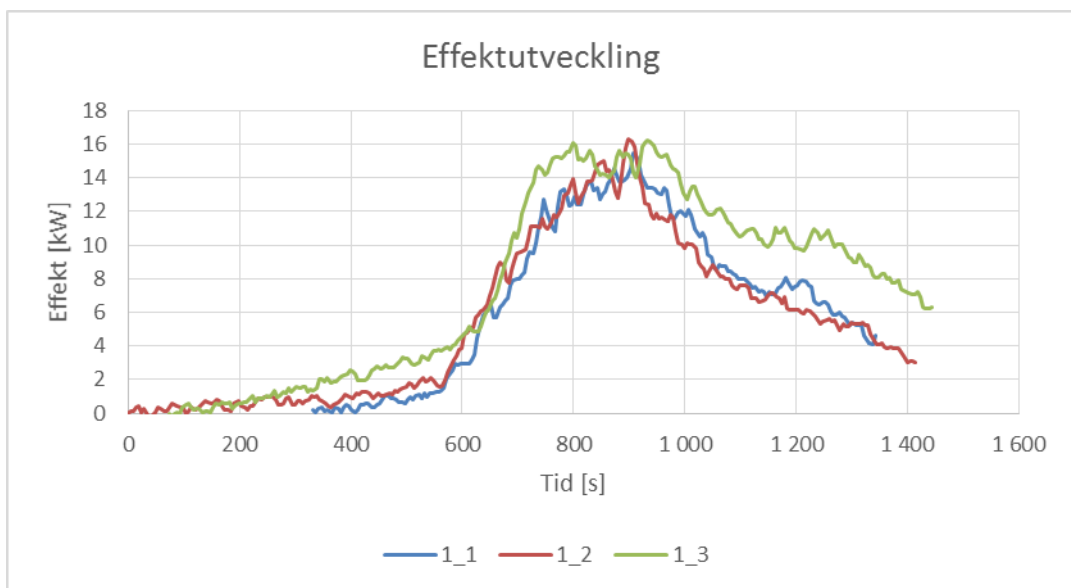


För att kunna jämföra FDS-simuleringarna och handberäkningarna med experimenten som utförts behövde en effektkurva som representerade varje försöksuppställning väljas. Eftersom varje försöksuppställning genomförts tre gånger fanns tre stycken effektkurvor för varje fall. För att välja ut en av kurvorna som representativ för den aktuella försöksuppställningen jämfördes kurvorna grafiskt och eventuella anteckningar från experimenten togs i åtanke. Den kurva som bäst representerade de andra två och inte hade några avvikande notiser från försöken valdes. Överlag var överensstämmelsen mellan effektkurvorna från samma försöksuppställning bra, särskilt under tillväxtfasen och framförallt för den snabba bränsleuppställningen.

Ett jämförelsedigram för effektkurvorna från försöksuppställning 8 redovisas i Figur 3.9, spridningen mellan dessa kurvor anses vara representativ för de snabba bränsleuppställningarna. För denna uppställning valdes kurvan från försök 8\_1 till simulering och handberäkningar. I Figur 3.10 visas ett jämförelsedigram för effektkurvorna från försöksuppställning 1, spridningen mellan dessa kurvor anses vara representativ för de långsamma bränsleuppställningarna. I detta fall valdes kurvan från försök 1\_1 till simulering och handberäkningar. Effekt- och temperaturkurvor från experimenten för alla försöksuppställningar finns redovisade i Bilaga C.



Figur 3.9: Effektkurvorna för de tre försöken på uppställning 8. Notera att kurvorna har förskjutits för att tillväxtfasen ska överlappa och att antändning därför inte sker vid tidpunkten noll sekunder för alla försök. Spridningen mellan kurvorna anses vara representativ för snabba bränsleuppställningar.



Figur 3.10: Effektkurvorna för de tre försöken på uppställning 1. Notera att kurvorna har förskjutits för att tillväxtfasen ska överlappa och att antändning därför inte sker vid tidpunkten noll sekunder för alla försök. Spridningen mellan kurvorna anses vara representativ för långsamma bränsleuppställningar.

I Tabell 3.6 presenteras vilka effektkurvor som valdes ut för att representera de åtta olika försöksuppställningarna.

Tabell 3.6: Valda effektkurvor som representerar de olika försöksuppställningarna.

Försöksuppställning	Vald effektkurva
1	1_1
2	2_2
3	3_3
4	4_1
5	5_3
6	6_3
7	7_3
8	8_1

### 3.3 Handberäkningar – Temperatur

Metodikerna som använts för att genomföra de handberäkningar som redovisats i Avsnitt 2.1 presenteras mer ingående i följande avsnitt. Effektkurvorna som använts kommer från försök utförda på motsvarande försöksuppställning. Om inte annat anges har storleken på parametrarna i handberäkningsmetoderna ansatts enligt Tabell 3.7. Materialegenskaper för rummets väggar och isolering har presenterats i Tabell 3.2 i Avsnitt 3.2.1. Beräkningarna har gjorts för varje tidssteg med hjälp av programmet Microsoft Excel.

Tabell 3.7: Ingångsparametrar för handberäkningsmetoderna.

Storhet	Värde	Enhet
Bredd	0,6	m
Längd	0,9	m
Höjd	0,6	m
Bredd öppning	0,3	m
Konvektiv effekt ( $\dot{Q}_c$ )	$0,65 * \dot{Q}$	kW (D. Walton & H. Thomas, 2002)
$T_\infty$	293	K
g	9,81	m/s <sup>2</sup>
$c_p$ , luft	1,005	kJ/(kg*K)

I flera handberäkningsmetoder är den termiska penetrationstiden en viktig parameter som styr hur värmeövergångstalet beräknas. Under försöken som genomförs i detta arbete varierades väggarnas och takets sammansättning beroende på försöksuppställning. Även då det oisolerade rummet studerades så skiljde väggarnas tjocklek från tjockleken i golv och tak. Materialegenskaperna och de olika försöksuppställningarna presenteras i Avsnitt 3.2.

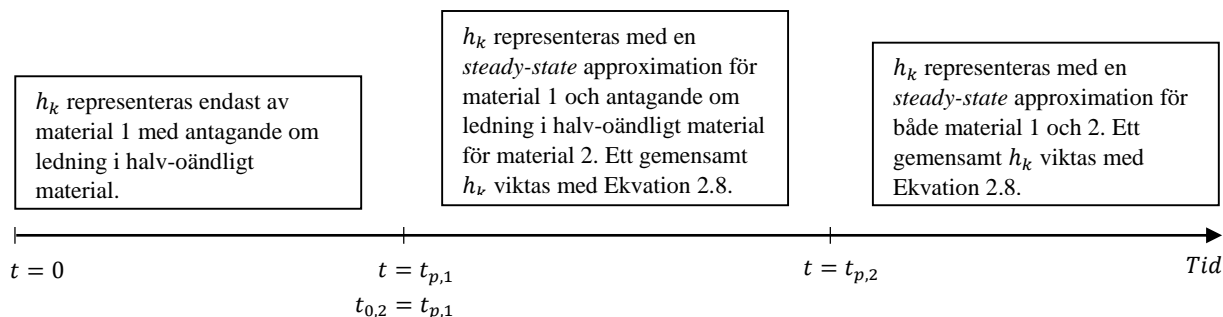
Beroende på försöksuppställning och om det är väggarna, taket eller golvet som studeras, så kommer den termiska penetrationstiden att vara olika. Den termiska penetrationstiden beräknas med Ekvation 2.4 och är presenterad i Tabell 3.8. Beroende på om den termiska penetrationstiden passerats eller ej används två olika metoder för att beräkna värmeövergångstalet, detta har beskrivits mer ingående i Kapitel 2 för respektive handberäkningsmetod.

Tabell 3.8: Termisk penetrationstid för de olika delarna av rummet. Notera att golvet har samma sammansättning i både oisolerade och isolerade försök.

Byggnadsdel	Termisk penetrationstid [s]
Oisolerad vägg	202
Isolerad vägg	1959
Oisolerat tak	809
Isolerat tak	2566
Golv	809

För att uppskatta värmeövergångstalet,  $h_k$ , används olika metoder beroende på om den termiska penetrationstiden har passerats eller ej, så som beskrivs i Avsnitt 2.1. För försöksuppställningarna med isolerade väggar behöver en sammanvägning av värmeövergångstalet för de två olika väggmaterialen göras. I detta arbete har två olika metoder för denna sammanvägning testats. Den första metoden innebär att värmeövergångstalet för den isolerade väggen beräknas med Ekvation 2.8 under hela brandförloppet. I den andra metoden tas ingen hänsyn till isoleringen förrän den termiska penetrationstiden för det innersta materialet har passerats. Därefter beräknas värmeövergångstalet på samma sätt som i den första metoden. Den andra metoden refereras härnäst till som alternativt  $h_k$ .

Metoden alternativt  $h_k$  beskrivs mer ingående av Figur 3.11. I figuren illustreras en tidsaxel där den termiska penetrationstiden för de två olika materialen är utmarkerade. Värmeövergångstalet beräknas på olika sätt beroende på vilken del av förloppet som studeras, se texturor i figuren. Metoden kan anpassas för flera material än två.



Figur 3.11: Figuren beskriver en alternativ metod för att uppskatta värmeövergångstalet för två material i en vägg, metoden går att anpassa för flera material än två. Det innersta materialet benämns som material 1 och det yttersta som material 2. Tidpunkten  $t_p$  innebär att den termiska penetrationstiden för det aktuella materialet uppnåtts.

Ytterligare en metod för att uppskatta värmeövergångstalet har undersökts i detta arbete. I denna metod ansätts ett konstant  $h_k$  som är samma oberoende av väggtyp. Detta är en extrem förenkling av verkligheten men väldigt användarvänligt då  $h_k$  är en svår parameter att bestämma. Det konstanta värdet som har använts är  $25 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$  som bland annat används i Eurocode 1, EN1991-1-2 (European Committee for Standardisation, 2002). Denna metod refereras härnäst till som konstant  $h_k$ .

Resultaten från de olika metoderna för att uppskatta värmeövergångstalet jämförs i Bilaga D.

### 3.3.1 McCaffrey, Quintiere och Harkleroad (MQH)

Metoden som McCaffrey, Quintiere och Harkleroad har utvecklat är framtagen för brandförlopp med konstant effektutveckling. I detta arbete används den för att räkna på tidsberoende förlopp genom att en beräkning sker för varje tidssteg. Den uppmätta effektutvecklingen från experimenten används. Beräkningarna följer metodiken beskriven i Avsnitt 2.1.1.

Den termiska penetrationstiden för alla i detta arbete använda vägg/golv/tak-typer presenteras i Tabell 3.8.

### 3.3.2 Johansson, Svensson och van Hees

I metoden som tagits fram av Johansson et al. behöver flammhöjden bestämmas. I det här arbetet bestäms den genom att approximera det brinnande träets förbränningsvärme och massavbrinning till samma som för metanol. Förbränningsegenskaperna för metanol presenteras i Tabell 3.9. Med hjälp av denna approximation kan Heskestads flammhöjdsformel, Ekvation 2.15, för pölbränder användas för att ta fram en flammhöjd. Metanol användes för att representera trä eftersom förbränningsvärmerna för metanol är ungefär lika stor som för trä (Karlsson & Quintiere, 1999). Metoden ger en flammhöjd som är rimlig och stämmer överens med visuella observationer under experimenten.

Tabell 3.9: Förbränningsegenskaper för metanol (Karlsson & Quintiere, 1999).

Storhet	Värde	Enhet
$\Delta H_c$	20 000	kJ/kg
$\dot{m}''$	0,025	Kg/(m <sup>2</sup> *s)
$\chi$	0,9	-

För att applicera metoden framtagen av Johansson et al. på tidsberoende brandförlopp har beräkningarna genomförts för varje tidssteg i effektmätningen från experimenten, det vill säga var femte sekund.

### 3.4 Handberäkningar – Brandgaslagrets höjd

Metodiken som använts för att genomföra de handberäkningar som redovisats i Avsnitt 2.2 presenteras mer ingående i följande avsnitt. Effektkurvorna som använts kommer från försök utförda på motsvarande försöksuppställning. Om inte annat anges har storleken på parametrarna i handberäkningsmetoderna ansatts enligt Tabell 3.7. Materialegenskaper för rummets väggar och isolering har presenterats i Tabell 3.2 i Avsnitt 3.2.1. Beräkningarna har gjorts för varje tidssteg med hjälp av programmet Microsoft Excel.

#### 3.4.1 Yamana och Tanaka

För att beräkna brandgaslagrets höjd med metoden utvecklad av Yamana och Tanaka undersöktes först hur effektutvecklingen förhåller sig till tiden, se Ekvation 2.19. Variabeln  $n$  antogs vara två då bränder ofta tillväxer kvadratisk med tiden (Karlsson & Quintiere, 1999). Genom att använda maxeffekten och tiden till att maxeffekten uppnåddes kunde  $\alpha$ -värdet beräknas med hjälp av Ekvation 3.1 som är en omskrivning av Ekvation 2.19. Alla i detta arbete använda  $\alpha$ -värden och en jämförelse mot de faktiska effektkurvorna är presenterade i Bilaga B.

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{Max}}{t^2} \quad \text{Ekvation 3.1}$$

Sedan beräknades konstanten  $k$  för alla tidssteg. I stället för att gissa densiteten i brandgaslagret beräknades den med hjälp av Ekvation 2.22. Temperaturen uppskattades med hjälp av metoden presenterad av Johansson et al. som har beskrivits i Avsnitt 2.2.1.

Till sist beräknades brandgaslagrets höjd med Ekvation 2.20. Metoden som presenteras i Avsnitt 2.2.1 och förtydligas i detta metodavsnitt är giltig så länge inga brandgaser ventileras ut ur utrymmet (Karlsson & Quintiere, 1999). För försöksuppställningarna studerade i detta arbete innebär det att Yamana och Tanakas metod är giltig så länge som brandgaslagret ligger ovanför öppningen, alltså i brandförloppet början.

#### 3.4.2 Johansson, Svensson och van Hees kombinerad med Yamana och Tanaka

Beräkningsmetoden framtagen av Johansson et al presenterad i Avsnitt 2.1.2 förutsätter att ett flöde av brandgaser sker ut genom öppningen. Beräkningsmetoden framtagen av Yamana och Tanaka presenterad i Avsnitt 2.2.1 är istället endast giltig då inget flöde av brandgaser sker ut genom öppningen. En kombination har undersökts där Yamana och Tanakas metod används för förloppets första del så länge inga brandgaser lämnar utrymmet. Därefter används metoden av Johansson et al. för resten av förloppet.

### 3.5 FDS-simulering

Inför simuleringarna av de olika försöksuppställningarna byggdes brandrummets geometri upp i FDS med hjälp av PyroSim. Två centimeters gridupplösning bedömdes med hjälp av Ekvation 2.23 och metoden som beskrivs i Avsnitt 2.3 vara tillräckligt högupplöst för att ge ett relevant resultat. För att testa att nodkonvergens uppnåtts simulerades även försöksuppställning 5 med en finare gridupplösning på en centimeter. Försöksuppställning 5 valdes eftersom värdet på  $D^*/\delta x$  var bland de lägsta i kombination med att tillväxten av branden skedde tidigt i förloppet, vilket reducerade simuleringstiden. Jämförelsen av resultaten från de två simuleringarna med olika gridupplösning redovisas i Bilaga A och visar att nodkonvergens uppnås. Värden på bland annat  $D^*/\delta x$  för simuleringarna redovisas i Tabell 3.10. För alla simuleringar med gridupplösningen två centimeter ligger värdet inom rekommendationsgränserna presenterade i Avsnitt 2.3. För simuleringen av försöksuppställning 5 med en centimeters gridupplösning var värdet 16,6.

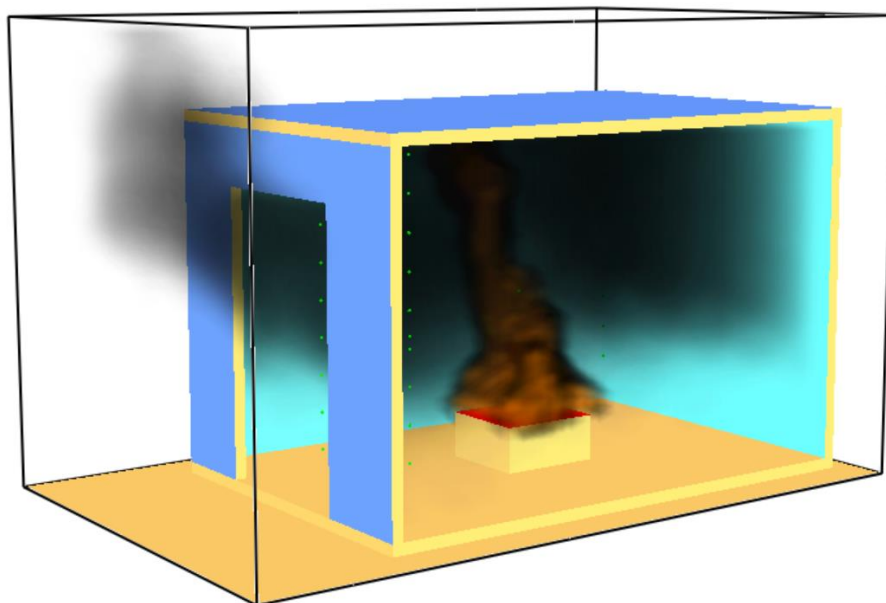
Storleken på beräkningsdomänen bestämdes så att kravet på avstånd mellan det simulerade rummets öppning och beräkningsdomänens gräns, som beskrivits i Avsnitt 2.3, uppfylldes.

Eftersom rumsuppbyggnaden och effektutvecklingen varierar mellan försöksuppställningarna behövde en FDS-fil skapas för varje uppställning. I Bilaga A redovisas en fullständig FDS-fil för försöksuppställning 1 och därefter redovisas även vilka parametrar i FDS-filerna som varierar mellan försöksuppställningarna.

Branden placerades i mitten av rummet precis som i experimenten men höjdes upp åtta centimeter, vilket ungefär representerar träribbstaplarnas höjd, för att undvika orealistiska luftströmningar. För varje simulering kontrollerades den dimensionslösa effektutvecklingen  $Q^*$  enligt Avsnitt 2.3. Resultatet presenteras i Tabell 3.10. I Figur 3.12 visas en överskådlig bild från en av simuleringarna som tydligt åskådliggör hur branden har höjts upp.

Tabell 3.10: Simuleringsparametrar för de olika försöksuppställningarna. Simuleringstiden sattes så att maxeffekt uppnåddes och passerades.

Försöksuppställning	Vald effektkurva	$D^*/dx$ ( $dx=0,02m$ )	$Q^*$	Simuleringstid [s]
1	1_1	9,1	1,0	700
2	2_2	10,3	1,4	450
3	3_3	7,5	0,6	650
4	4_1	9,7	1,2	600
5	5_3	8,3	0,8	600
6	6_3	10,3	1,4	450
7	7_3	8,7	0,9	550
8	8_1	10,9	1,6	450



Figur 3.12: En överskådlig bild från en av FDS-simuleringarna. En av väggarna har gjorts genomskinlig för att öka insynen.

Reaktionen för brinnande trä specificerades enligt BIV:s tillämpningsdokument för CFD-beräkningar med FDS (BIV, 2013). Sot- och kolmonoxidproduktion specificerades enligt värden i *Enclosure Fire Dynamics* (Karlsson & Quintiere, 1999). Värdena presenteras i Tabell 3.11.

Tabell 3.11: Reaktionsparametrar för trä från (BIV, 2013) och (Karlsson & Quintiere, 1999).

Reaktionsparametrar	Värde	Enhet
Soot-yield	0,015	g/g
CO-yield	0,005	g/g
	C	3,4
Kemisk sammansättning	H	6,2
	O	2,5
	N	0
Förbränningsvärme ( $\Delta H_c$ )	17000	kJ/kg

En typ av vägg skapades för de oisolerade fallen och en annan för de isolerade fallen. För att göra de isolerade väggarna skapades olika lager med termiska egenskaper motsvarande de hos brandskyddsskivorna och stenullsisoleringen. En snabb, enkel simulering genomfördes för att kontrollera att värmeöverföringen genom väggarna fungerade.

Temperaturmätare för gastemperaturen i simuleringarna placerades ut på motsvarande positioner som för termoelementen i experimenten. För att undersöka rimlighet i simuleringarna placerades också att antal *slice-files* ut för att mäta temperaturer och hastigheter. Även en *boundary-file* lades in för att mäta temperaturen på väggarna i rummet. Utdata registrerades mer än en gång per sekund under simuleringarna.

När simuleringarna genomförts kontrollerades effektutvecklingen genom att effekten i FDS jämfördes med den uppmätta effektutvecklingen. Denna kontroll genomfördes för samtliga simuleringar och det säkerställdes att rätt effektutveckling lagts in i indatafilen till FDS för alla försöksupställningar.

### 3.6 Jämförelse av data

När experimenten, simuleringarna och handberäkningarna var klara återstod att jämföra och analysera all data.

Först genomfördes en datareduktion av temperaturdata från experiment och simuleringar enligt metoden beskriven i Avsnitt 2.4. Detta för att kunna jämföra experimenten och simuleringarna med handberäkningarna på ett tydligare sätt. Då detta arbete studerar tidsberoende förlopp, så behöver datareduktionen genomföras för hela förloppet. En förenkling gjordes till att genomföra beräkningen ungefär var nionde sekund. Detta tidssteg valdes då det ansågs ge tillräckligt hög upplösning, men ändå minskade beräkningsmängden avsevärt mot att genomföra beräkningen för varje uppmätt tidssteg i experiment och simuleringar. För att minska effekten av fluktuationer i temperaturen, så togs ett medelvärde för temperaturen runt varje utvalt tidssteg. Detta innebär att trots att bara var nionde sekund datareducerades, så användes ändå data från alla tidssteg för att få ett så korrekt resultat som möjligt. Temperaturen från både termoelementträd ett och två användes vid beräkningen genom att ett medelvärde beräknades mellan termoelementen på samma höjd i de två träden och därefter genomfördes datareduktionen.

Eftersom datareduceringsmetoden som används är samma som FDS använder så kunde beräkningarnas korrekthet kontrolleras genom att jämföra med utdata från funktionen *Layer Height* i FDS (McGrattan, et al., 2015).

När datareduktionen var genomförd för alla experiment och simuleringar, sammanställdes alla resultat. Temperaturen och brandgaslagrets höjd framtaget på olika sätt presenteras för respektive försöksupställning i Kapitel 4.



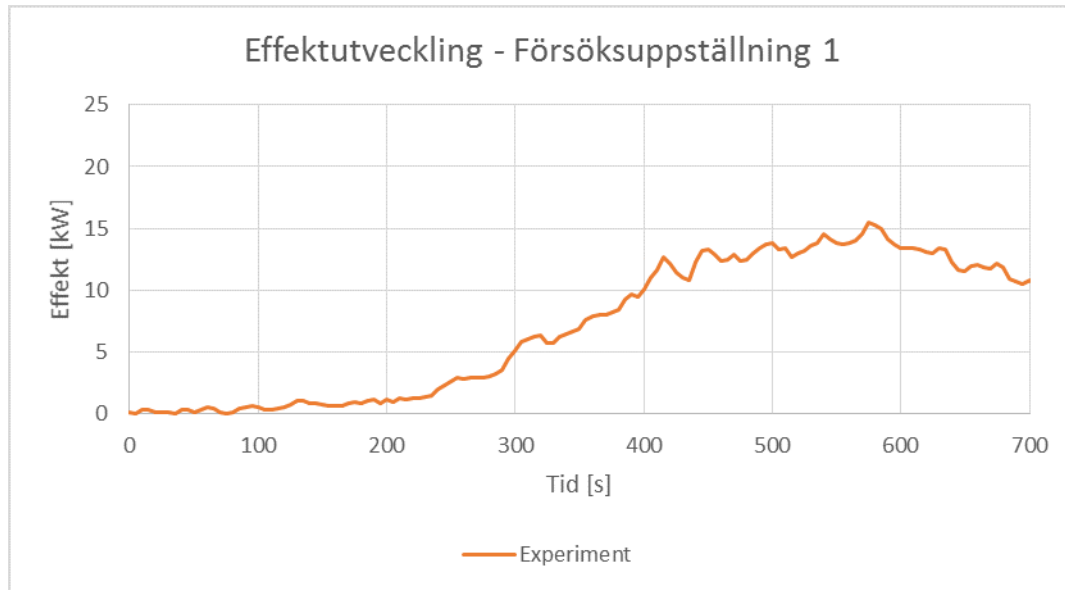


## 4 Resultat

I resultatkapitlet presenteras resultaten från experiment, simuleringar och handberäkningar uppdelat på respektive försöksuppställning. I Bilaga E presenteras en jämförelse mellan försöksuppställningar där endast en parameter, det vill säga öppningshöjd, isolering eller bränsleuppställning, ändras i taget. I dessa jämförelser framgår varje enskild parameters påverkan på resultatet tydligt.

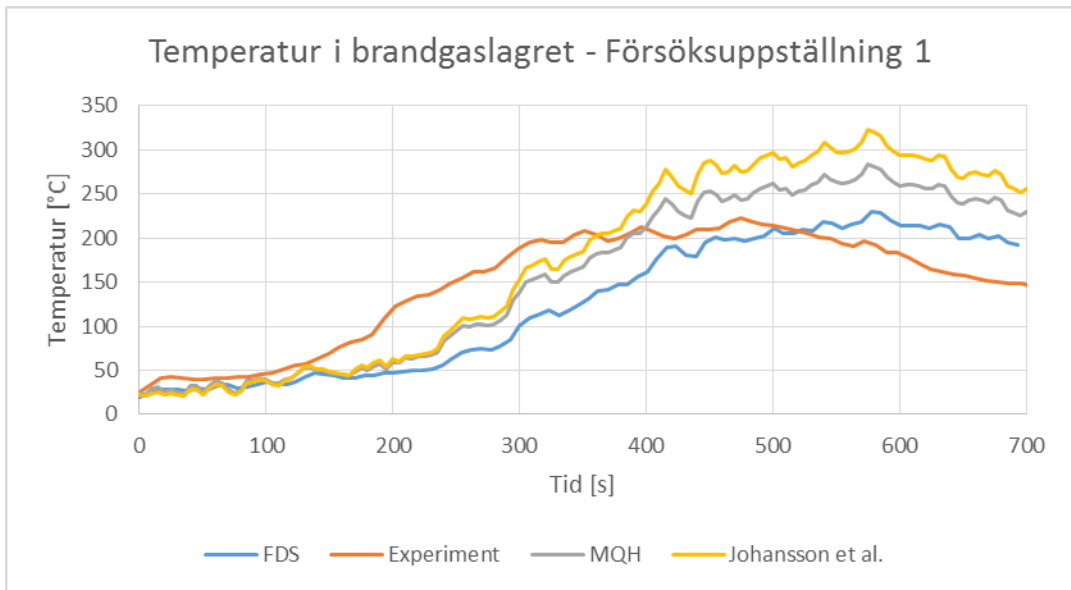
### 4.1 Försöksuppställning 1 – långsam brand, stor öppning, oisolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.1. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



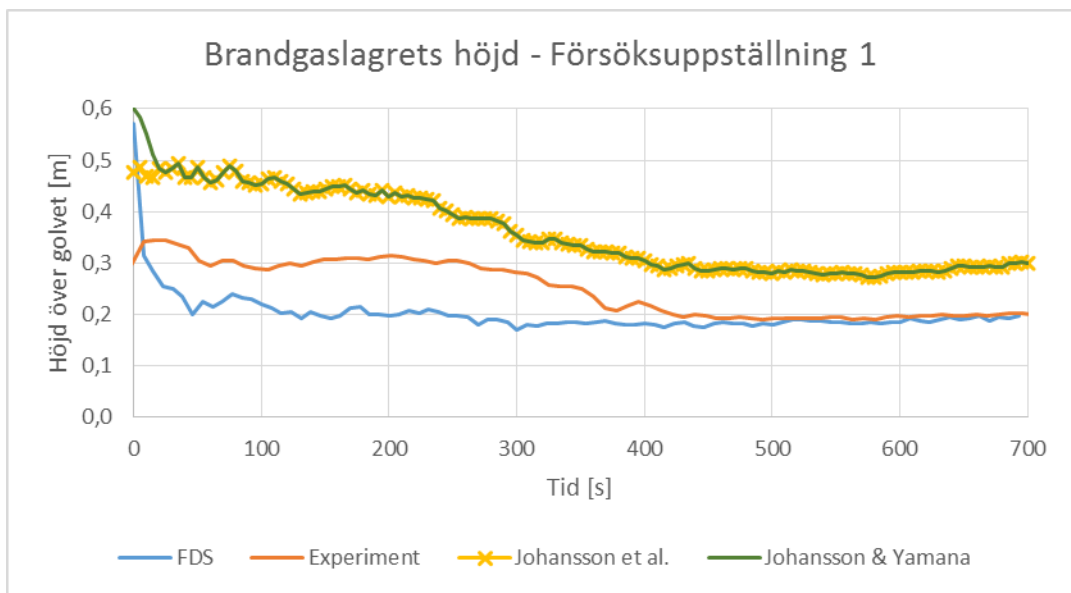
Figur 4.1: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.2 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.2: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

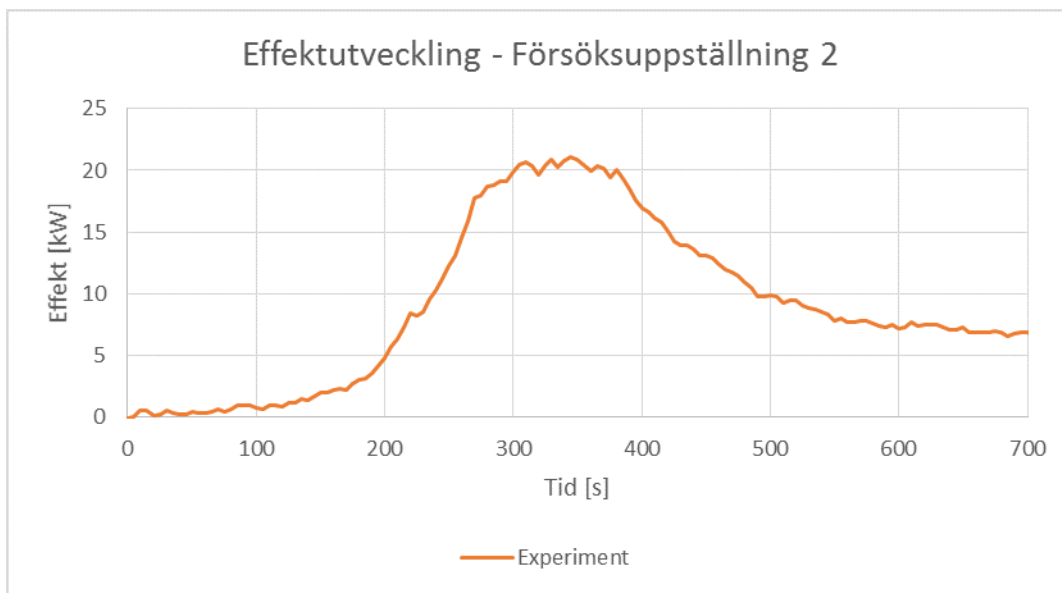
Figur 4.3 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.3: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

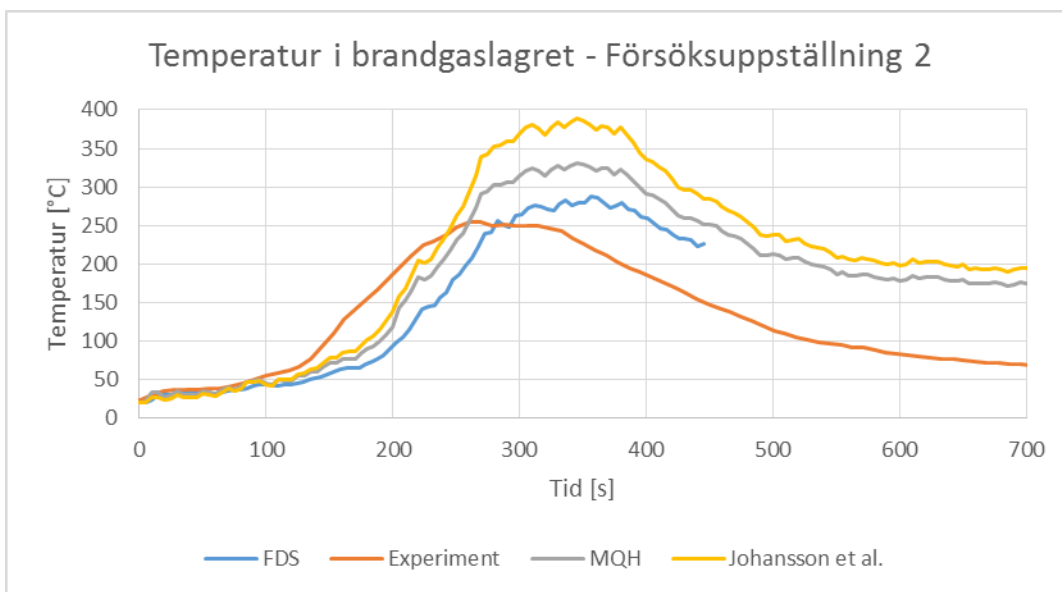
## 4.2 Försöksuppställning 2 – snabb brand, stor öppning, oisolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.4. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



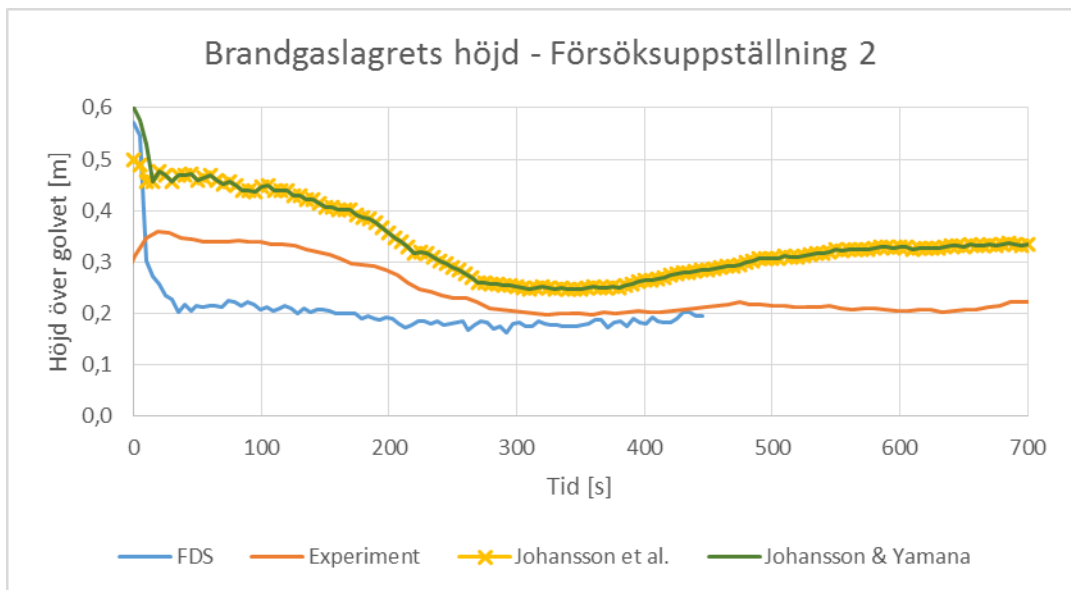
Figur 4.4: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.5 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.5: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

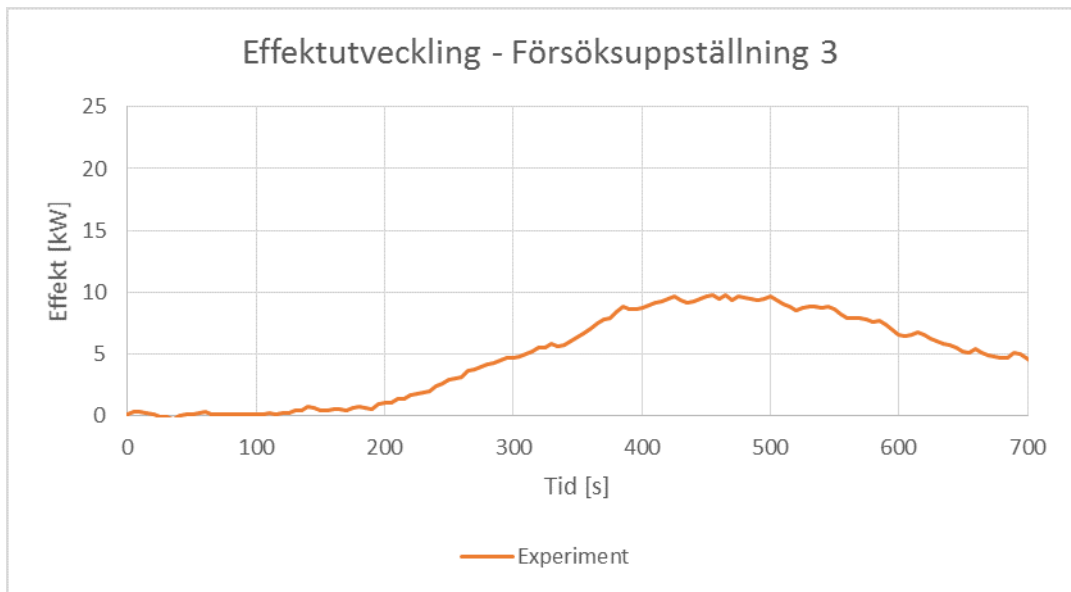
Figur 4.6 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.6: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

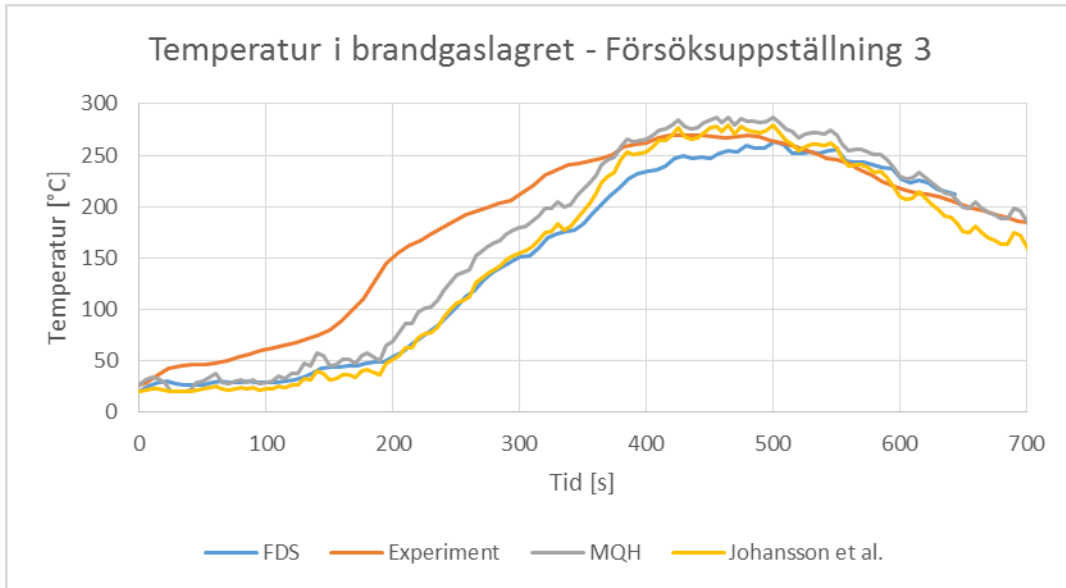
### 4.3 Försöksuppställning 3 – långsam brand, liten öppning, oisolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.7. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



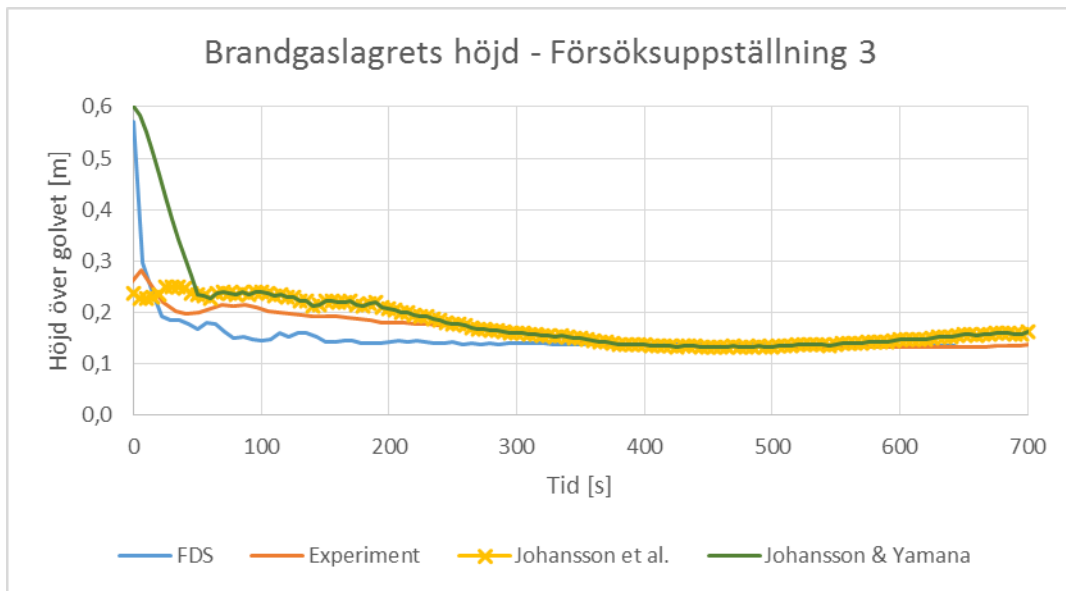
Figur 4.7: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.8 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.8: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

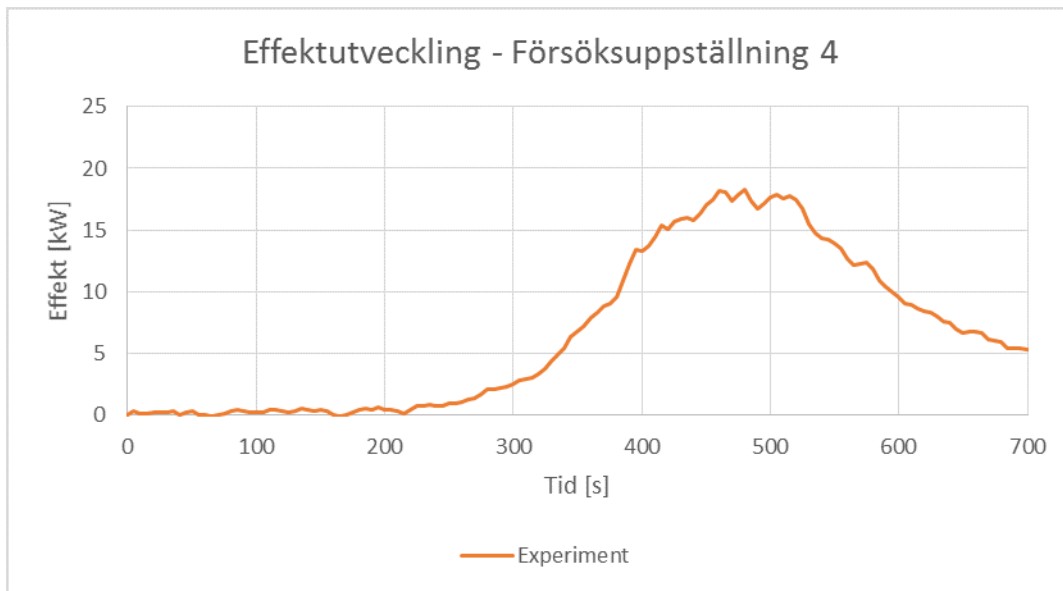
Figur 4.9 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.9: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

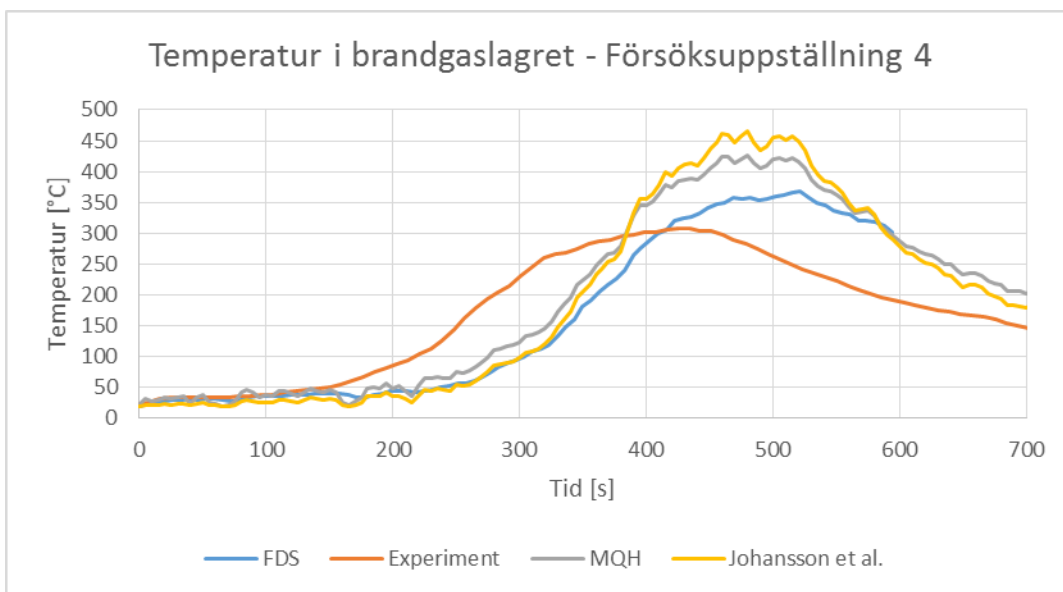
#### 4.4 Försöksuppställning 4 – snabb brand, liten öppning, oisolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.10. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



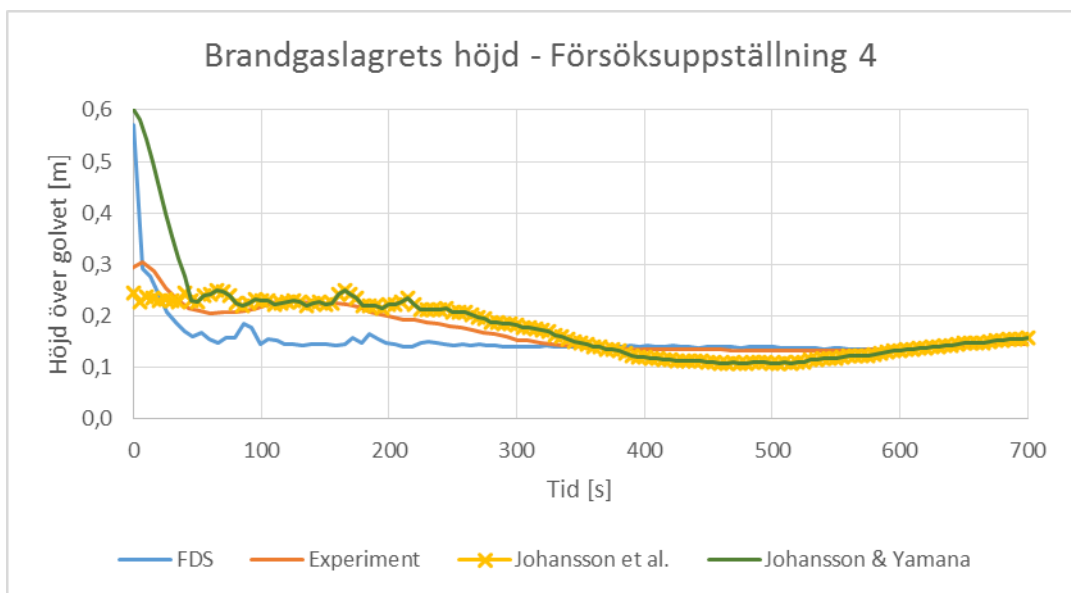
Figur 4.10: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.11 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.11: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

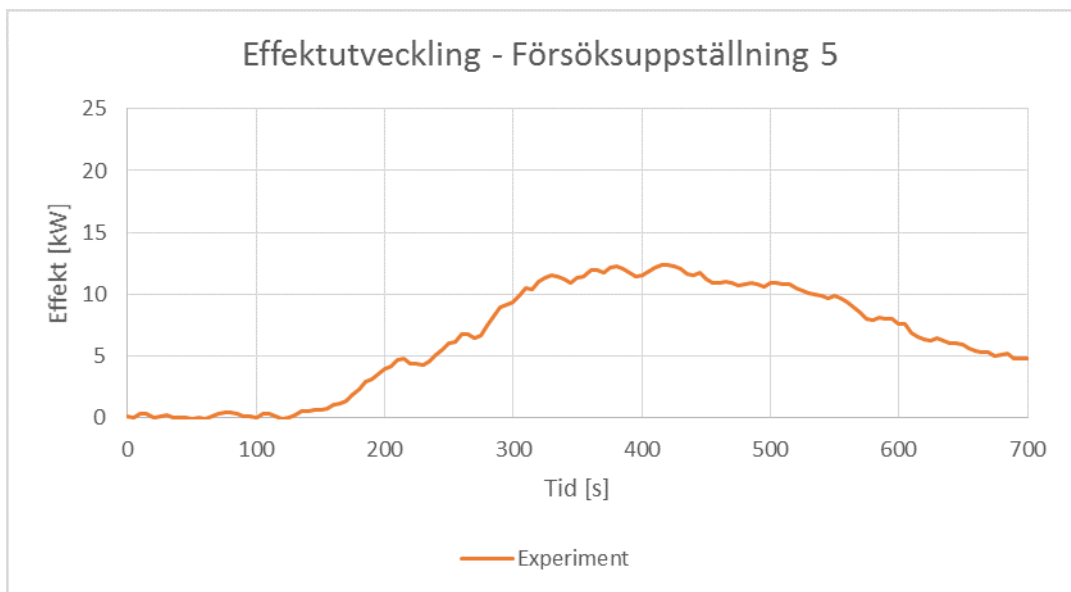
Figur 4.12 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.12: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

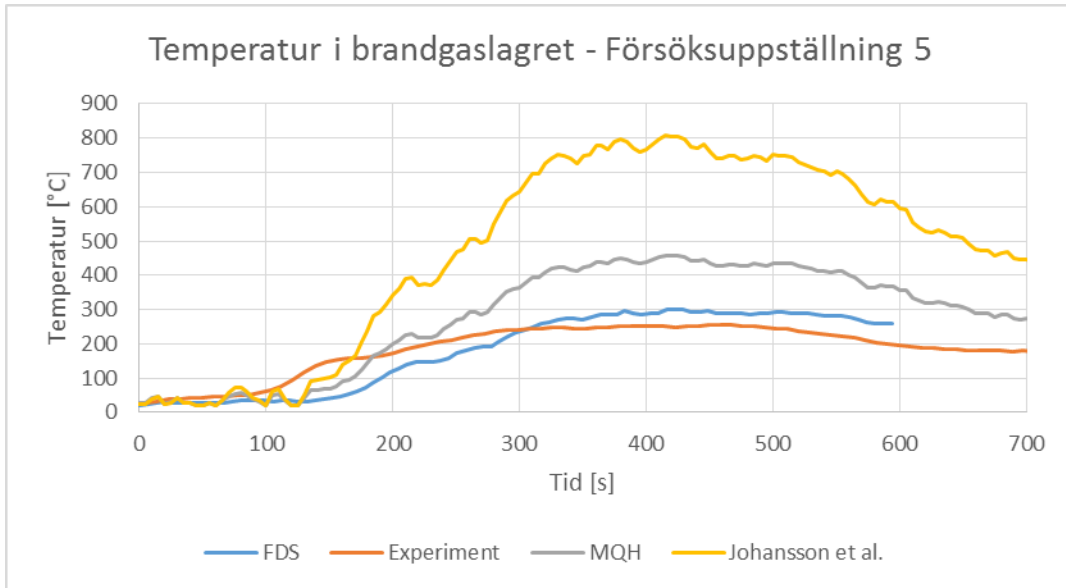
#### 4.5 Försöksupställning 5 – långsam brand, liten öppning, isolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.13. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksupställningen.



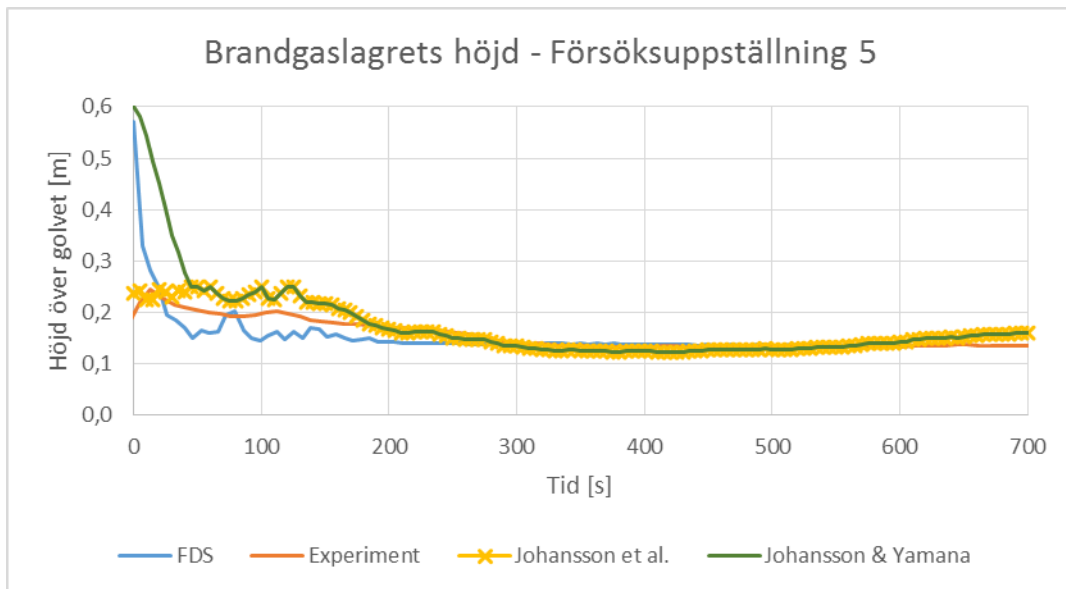
Figur 4.13: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksupställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.14 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.14: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

Figur 4.15 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.

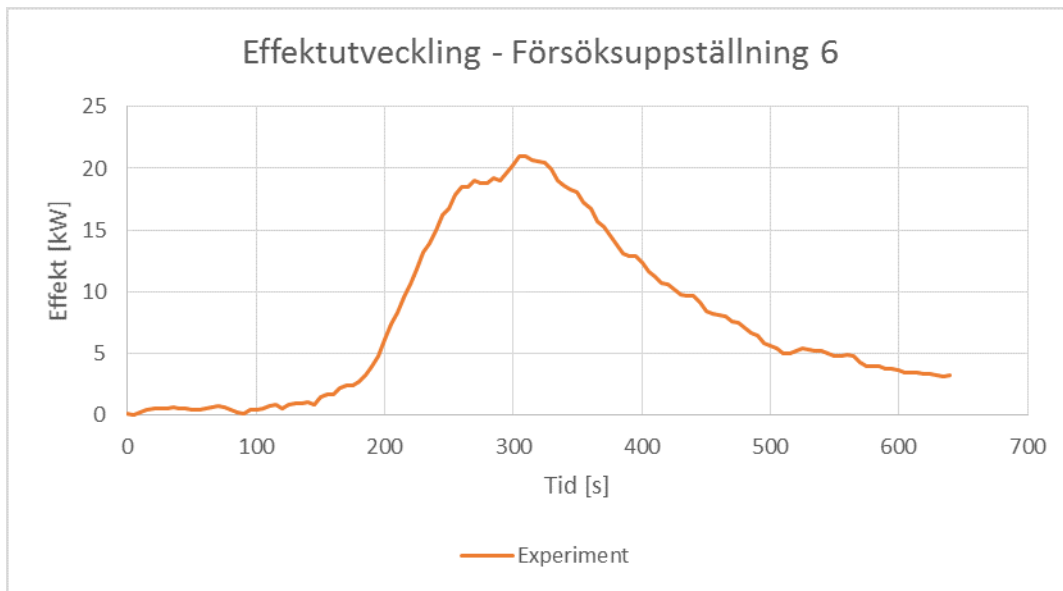


Figur 4.15: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.



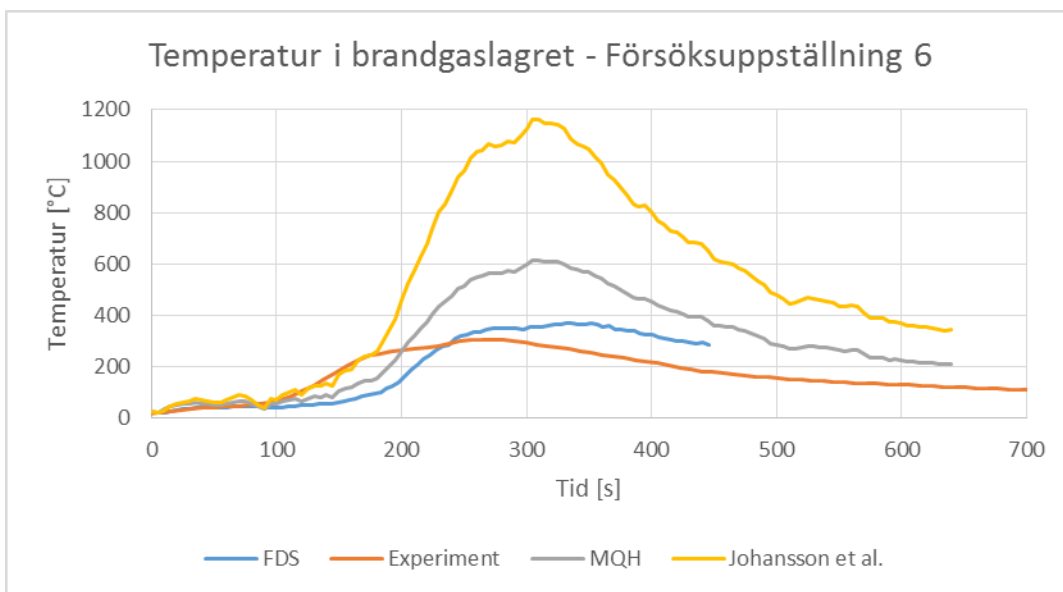
## 4.6 Försöksuppställning 6 – snabb brand, liten öppning, isolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.16. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



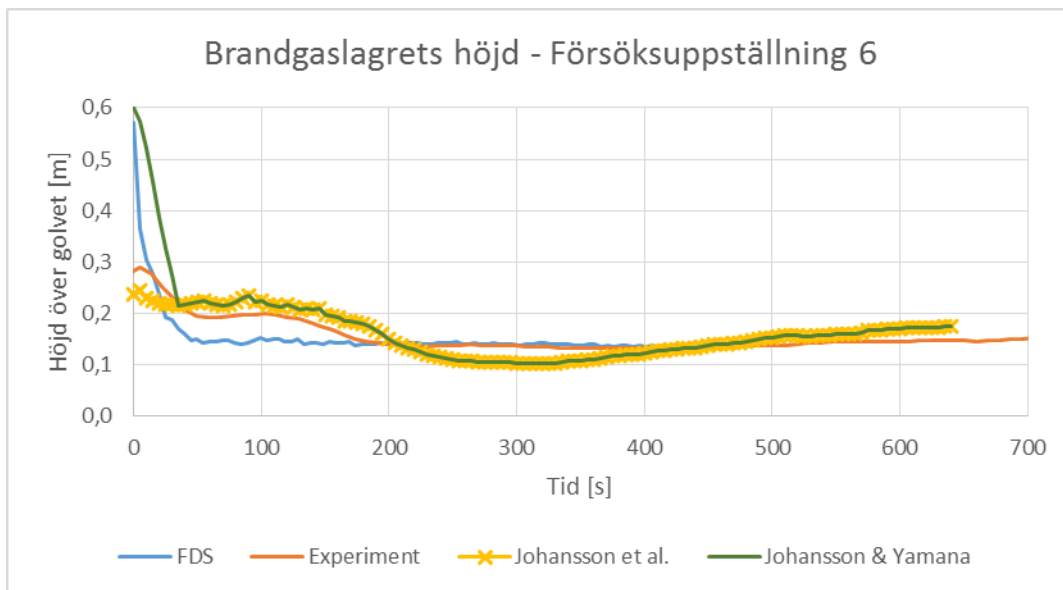
Figur 4.16: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.17 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.17: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

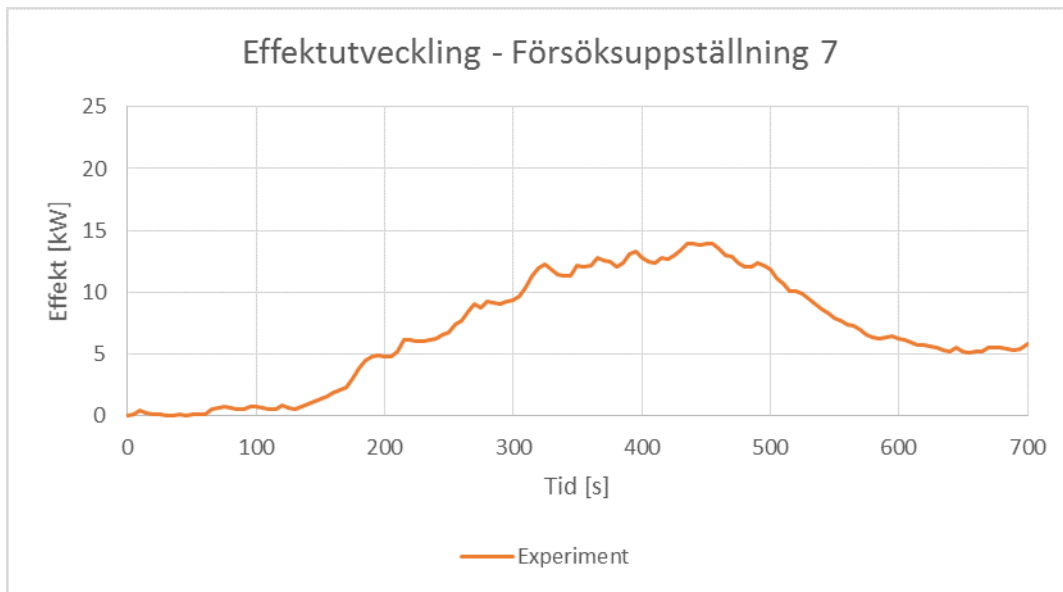
Figur 4.18 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.18: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

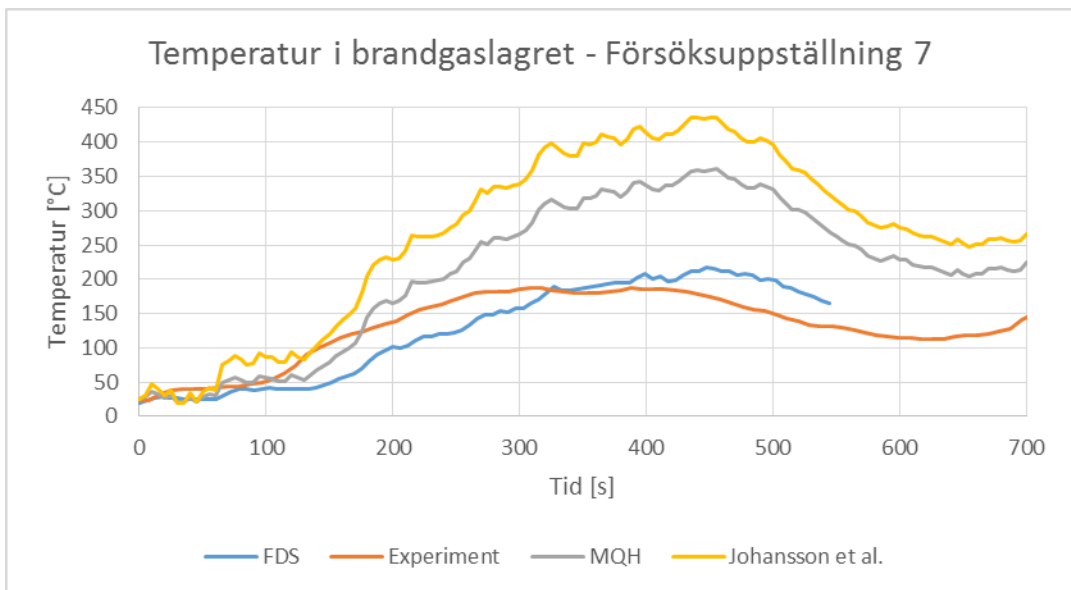
#### 4.7 Försöksupställning 7 – långsam brand, stor öppning, isolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.19. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksupställningen.



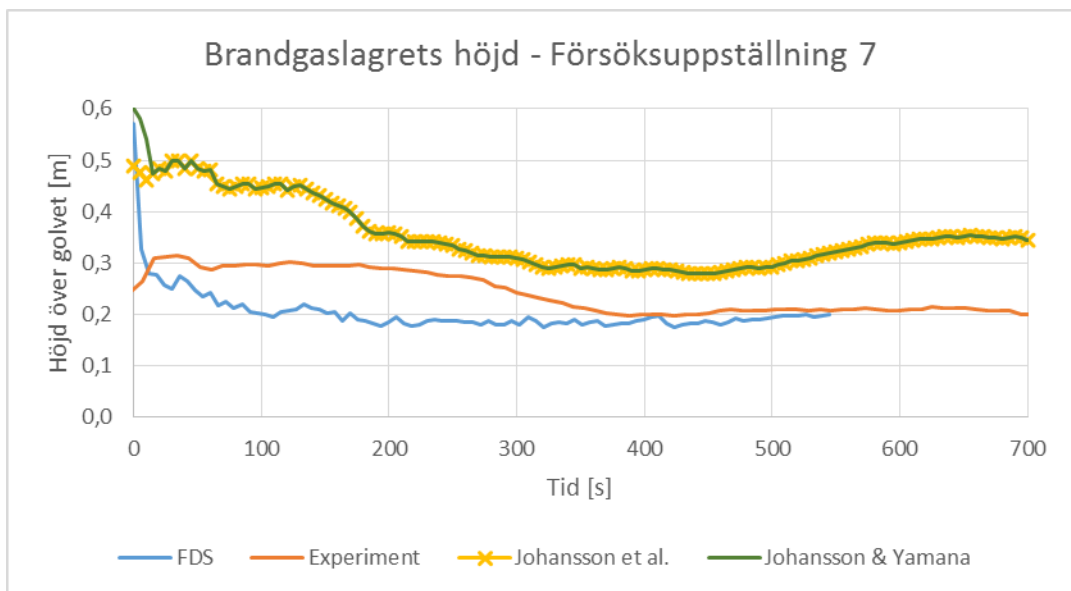
Figur 4.19: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksupställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.20 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.20: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

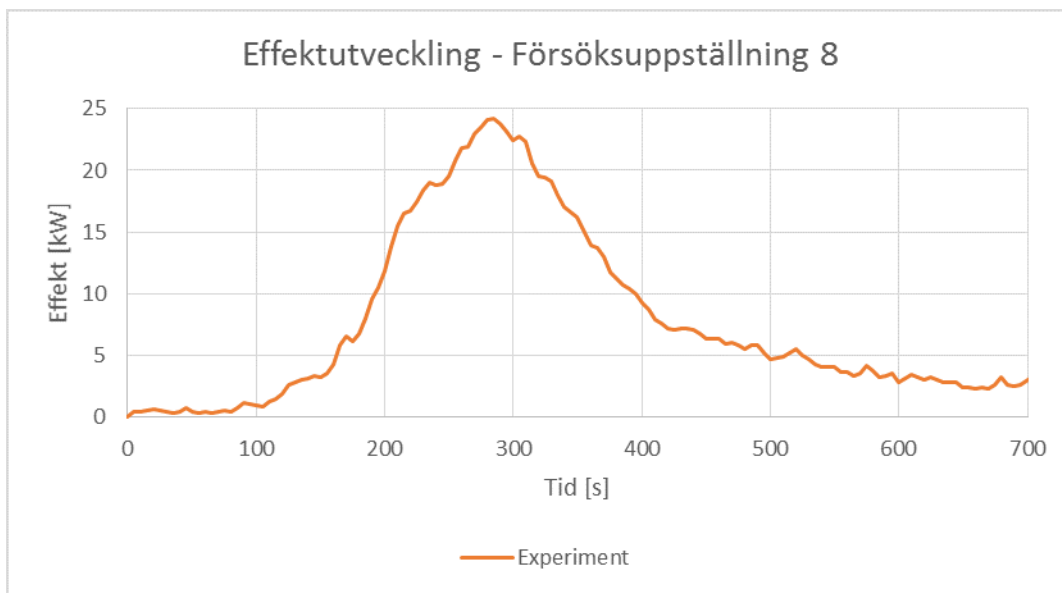
Figur 4.21 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.21: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

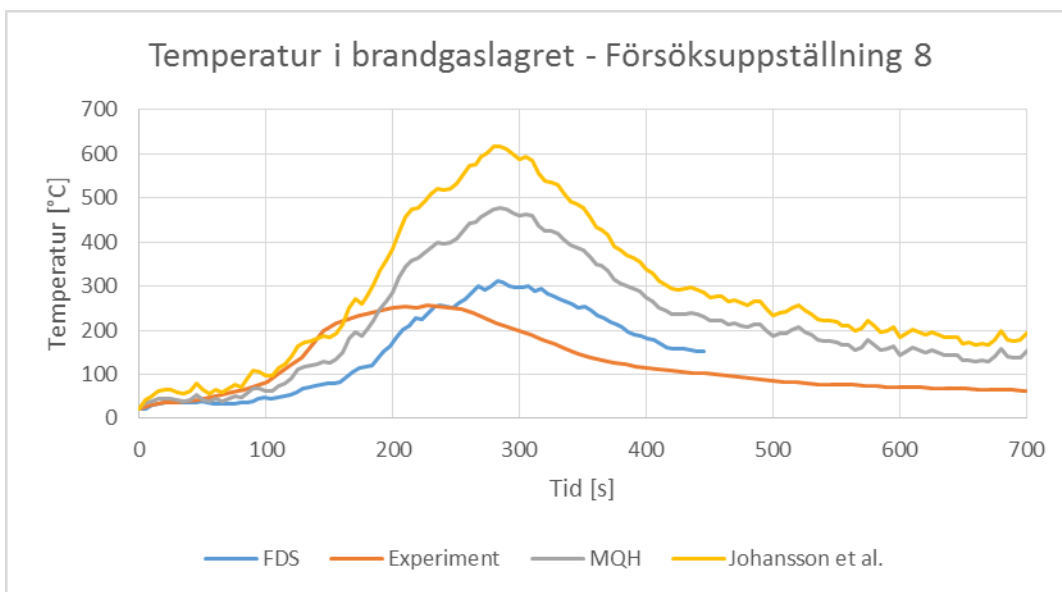
## 4.8 Försöksuppställning 8 – snabb brand, stor öppning, isolerad

Effektkurvan som uppmättes vid experimentet presenteras i Figur 4.22. Denna effektkurva användes vid simulering och handberäkning av den aktuella försöksuppställningen.



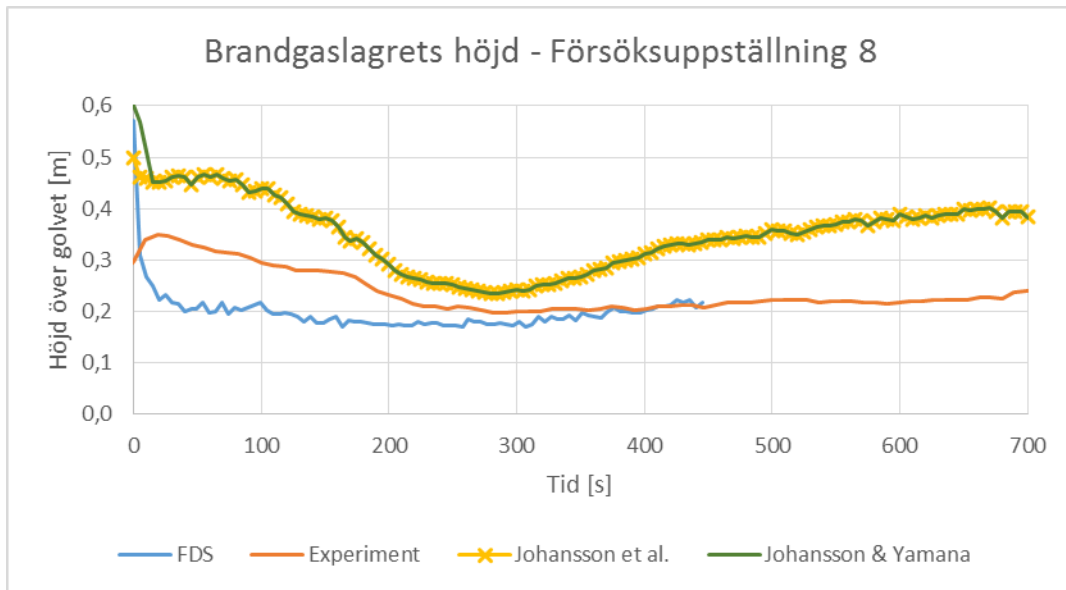
Figur 4.22: Effektutvecklingen som registrerades vid experimentet som en funktion av tiden. Vid handberäkningar och simulering av den aktuella försöksuppställningen användes effektkurvan från experimentet.

Figur 4.23 nedan visar temperaturen som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.23: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.

Figur 4.24 nedan visar brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkning.



Figur 4.24: Brandgaslagrets höjd som en funktion av tiden för experimentet, FDS-simulering och handberäkningar.



## 5 Diskussion

Arbetet som presenterats i denna rapport har bestått av olika delmoment. Denna diskussion utgår från dessa delmoment, men även allmänna reflektioner diskuteras.

### 5.1 Experimenten

De effektkurvor som uppmättes under experimenten användes i arbetet både för att genomföra handberäkningar och simuleringar. Detta gör att felkällor i samband med effektmätningen kan få ett genomslag genom hela arbetet när det gäller jämförelser mellan olika data kopplat till en viss effekt och tid. I många av de temperaturkurvor som presenteras i Kapitel 4 framgår det att temperaturerna i experimentet ökar lite tidigare än temperaturerna som erhållits från handberäkningar och simuleringar. Detta beror troligtvis på svårigheter med att mäta den tidiga, låga effekten i experimenten. Även under avsvälningssfasen verkar det finnas svårigheter med att mäta effekten, då vad som bedöms vara orimligt höga effekter ofta registrerades när det bara var glöd kvar. Tidigt i brandförloppen har det också hänt att små negativa effekter uppmätts, något som också tyder på att effektmätningen inte är helt korrekt.

Vid antändning av träribbstaplarna vid försöken användes papper och T-sprit. Om effekten mättes exakt skulle en liten effekttopp visas precis efter antändning då T-spriten brinner. Denna effekttopp saknas dock i de uppmätta effektkurvorna vilket tyder på att de låga effekterna i början av brandförloppen inte loggades korrekt. Den uteblivna effekttoppen i början av brandförloppen kan vara orsaken till att många temperaturkurvor som baseras på den loggade effekten har en något senare temperaturstegring.

Metoden att använda en effektkurva för att representera en försöksuppställning innebär att bra jämförelser kan göras mellan experiment, simuleringar och handberäkningar. Den bygger dock på att de erhållna effektkurvorna är någorlunda repeterbara för respektive försöksuppställning. Detta stämmer överlag för de effektkurvor som uppmättes vid försöken i detta arbete (se Bilaga C), särskilt bra repeterbarhet erhöles för försöksuppställningarna med snabb bränsleuppställning. Att repeterbarheten är god innebär att valet av representativ effektkurva inte är avgörande för slutsatserna i detta arbete.

I Bilaga C.9 undersöks variationer mellan försök på samma försöksuppställningar. Analysen behandlar försöksuppställning 1 och 8 då dessa anses representera spridningen mellan försöken på försöksuppställningar med långsamma respektive snabba bränslebål. I analysen framgår det att avvikelserna är större i början av förloppet men blir mindre när effekten ökar. För försöksuppställning 1, som representerar det långsamma bränslebålet, är den största procentuella spridningen på effekten 140 % och för temperaturen 15 %. Som minst är variationen för effekten 2 % och för temperaturen är den som minst 0,1 %. För försöksuppställning 8, som representerar det snabba bränslebålet, är den största procentuella spridningen på effekten 76 % och för temperaturen 27 %. Som minst är variationen för effekten 0,5 % och för temperaturen är den som minst 0,3 %. Analysen i Bilaga C.9 visar att variationen på effekten är störst i början av förloppet då effekterna är små. Variationen på temperaturen är störst under tillväxtfasen. Variationerna på både effekt och temperatur är som minst en tid in i förloppet när effekten och temperaturen är som störst. En variation i effekt på 140 % är mycket men eftersom det inträffar väldigt tidigt i förloppet påverkar det inte våra slutsatser. Då spridningen är 140 % är den faktiska effektskillnaden mellan försöken cirka 1,7 kW som kan jämföras med maxeffekten i försöken som är cirka 16 kW. Även denna kvantitativa analys av repeterbarheten visar att spridningen mellan försöken är acceptabel.

Ett undantag från de goda repeterbarheterna är effektkurvan från försök 3\_2 som avviker från de övriga effektkurvorna från försöksuppställning 3. Det kan inte uteslutas att det föreligger något fel i effektmätningen. Eftersom två andra försök gjorts på denna försöksuppställning valdes istället en av de två för att representera försöksuppställningen. Detta visar på vikten av att genomföra flera försök för samma försöksuppställning vid olika tillfällen.

Ett antal mindre oönskade variationer under försöken gick inte att undvika. Exempel på detta är bland annat skillnader i luftfuktighet, omgivningstemperatur och taktemperatur vid experimentstart. Dessa variationer var dock små och förväntas inte ha påverkat resultatet nämnvärt. Samma försöksuppställningar kördes aldrig direkt efter varandra för att ytterligare minska påverkan av sådana variationer. Termoelementens höjd kontrollerades före och efter att alla försök genomförts och de skillnader som noterades var endast marginella. Träribborna som användes som bränsle varierade något i storlek så som beskrivs i Tabell 3.4. Detta hanterades genom att bränslet vägdes innan antändning så att ungefär samma massa trä användes i varje försök. Vågen hade en noggrannhet på 50 gram och om hänsyn tas till denna kan det maximalt skilja 100 gram mellan försöken med långsam bränsleuppställning och 50 gram mellan försöken med snabb bränsleuppställning. I Bilaga F redovisas uppmätt bränslevikt för respektive försök.

Vid experimenten skiljer sig temperaturen mellan de båda termoelementträden som är placerade i rummet. Skillnaden i maxtemperatur varierade mellan cirka 20 och 50 grader Celsius. Vid den jämförande analysen görs ett antagande om att det bildas två zoner i rummet var i temperaturen i varje zon är uniform. Detta är ett vanligt antagande inom branddynamiksbereäkningar men stämmer inte helt överens med verkligheten. Då experimentdata reducerades användes temperaturdata från båda träden genom att beräkna ett medelvärde för varje höjd. Detta ansågs ge den mest rättvisande bilden utifrån de genomförda experimenten. Resultatet hade sett något annorlunda ut om endast data från ett termoelementträd använts. En djupare analys av hur temperaturmätningar gjorts vid framtagande av de olika handberäkningsmodellerna har inte genomförts. Detta kan framförallt påverka resultatet från MQH-modellen eftersom det är en experimentellt framtagen korrelation. Även om detta är ett val som påverkar erhållna utdata så anses det inte påverka det övergripande analysresultatet nämnvärt.

## 5.2 FDS-simulering

En kontroll har genomförts för att säkerställa att nodkonvergens uppnåtts med den gridupplösning som har använts. Att nodkonvergens uppnåtts innebär att inga större avvikelser i resultatet från simuleringarna förväntas bero på gridupplösningen.

I simuleringarna har branden representerats av en brinnande yta på en kub som är ungefär lika hög som bränsleuppställningarna. Detta innebär till exempel att skorstenseffekten som var tydlig i försöken inte uppstår i simuleringarna vilket kan vara en orsak till den något lägre flamhöjden i simuleringarna jämfört med observationer under försöken. Att representera branden på ett sätt som helt återspeglar verkligheten är omöjligt men det sätt som använts anses vara tillräckligt bra för att ge relevanta resultat. Detta grundas i att de rekommendationer som beskrivs i Avsnitt 2.3 följs.

Precis som i experimenten finns det viss skillnad mellan temperaturerna som uppmättes på motsvarande höjder i de två termoelementträden. Det är dock svårt att avgöra exakt hur stor skillnaden är på grund av stora fluktuationer. Fluktuationerna hade minskat om mätmetoden *thermocouple* använts i FDS men eftersom värden på det faktiska gastemperaturen önskade erhållas registrerades istället denna. Funktionen *thermocouple* hade varit mer intressant om simuleringarna skulle jämföras med försök. I detta arbete är det dock främst en jämförelse med handberäkningsmetoderna som är intressant. De olika temperaturerna hanterades på samma sätt som för experimenten när datareduceringen genomfördes. Se mer diskussion om detta i Avsnitt 5.1.

Valideringsekvationerna för  $D^*$  och  $\dot{Q}^*$  har beräknats för maxeffekten för varje simulerad effektkurva. Tidigt i förloppet, när effekten är låg, ligger värdena utanför de rekommenderade intervallen. Detta anses dock inte påverka analysen i någon större utsträckning.



## 5.3 Handberäkning

Nedan följer diskussioner om handberäkningarna uppdelat i de olika metoder som undersökts i arbetet. Även en allmän diskussion kring handberäkningsmetoderna förs.

### 5.3.1 Allmänt

De handberäkningar som har undersökts i detta arbete är framtagna för brandförlopp med konstanta effekter. Undantaget är beräkning av brandgaslagrets höjd med metoden utvecklad av Yamana och Tanaka som kan ta viss hänsyn till tidsberoende förlopp. I detta arbete appliceras alla dessa metoder på tidsberoende brandförlopp. Detta är en felkälla då beräkningarna inte används på det sättet de är framtagna för att användas. En del av arbetets syfte är att undersöka om beräkningsmetoderna går att använda utanför sitt ursprungliga användningsområde.

Då effektutvecklingen är konstant krävs endast en uträkning per förlopp. I detta arbete har en uträkning genomförts för varje tidssteg. Metoderna har alltså inte gjorts om men vissa parametrar, till exempel effektutvecklingen och värmeövergångstalet har hanterats som tidsberoende. Att genomföra en separat uträkning för varje tidssteg medför att ingen hänsyn tas till vad som hänt tidigare i förloppet. Detta är en förenkling av verkligheten då det egentligen blir skillnad på till exempel brandgaslagrets temperatur beroende på brandens tillväxthastighet.

En stor svårighet med handberäkningarna är hur hänsyn ska tas till uppbyggnaden av rummets väggar. Värmetransporten genom väggarna är en faktor som har stor inverkan på temperaturen i brandgaslagret. Hur denna faktor representeras i beräkningar och simuleringar är därför avgörande för resultatet. Både MQH-modellen och modellen utvecklad av Johansson et al. uppskattar ett värmeövergångsmotstånd för att beskriva värmetransporten genom väggarna. Detta beräknas med metoder som är beskrivna i Avsnitt 2.1. Metoderna är en förenkling av verkligheten och eftersom värmetransporten genom väggarna är viktigt för resultatet är det också viktigt att förenklingen sker på ett bra sätt. För väggar med flera material används en summaformel för värmemotståndet som tar hänsyn till alla material i väggen. Denna metod kan tyckas vara konstig då den tar hänsyn till yttre material innan den termiska vågen har passerat det inre materialet. Av denna anledning testades en annan metod för att uppskatta värmeövergångstalet, denna metod beskrivs i Avsnitt 3.3 och refereras till som alternativt  $h_k$ . Jämförelse mellan de båda metoderna visar att uppskattningen av värmemotståndet har stor betydelse för resultatet. Jämförelse visar också att metoden alternativt  $h_k$  inte överskattar temperaturen lika mycket som metoden med endast summaformeln (Ekvation 2.8) gör.

I de handberäkningsmetoder som har undersökts har tabellerade värden för termiska egenskaper (densitet, värmekonduktivitet och värmekapacitet) använts. Egenskaperna är temperaturberoende, dock är det vedertaget att ansätta dem till konstanter vid handberäkning då temperaturberoendet är förhållandevis litet. Det är även troligt att egenskaperna för väggarna har ändrats något från de tabulerade värdena då de har hettats upp och kylts ner flertalet gånger. Brandskyddsskivorna som brandrummets väggar bestod av har varit del av en tidigare laborationsserie och har alltså hettats upp och kylts ner många gånger. Ingen analys av hur materialens termiska egenskaper har påverkats av detta har genomförts.

### 5.3.2 MQH

Metoden utvecklad av McCaffrey, Quintiere och Harkleroad är experimentellt framtagen. Detta innebär att det kan ha betydelse för resultatet om försöksuppställningen i detta arbete liknar försöksuppställningarna som användes vid framtagandet av metoden. Ingen jämförelse mellan uppställningarna har genomförts i detta arbete.

### 5.3.3 Johansson et al.

I metoden framtagen av Johansson et al. ska en lämplig plymmodell antas med avseende på aktuellt brandrum. I Johansson et al. (2015) har Heskestads plymmodell antagits då den ansågs lämplig utifrån rådande förutsättningar. Denna modell har även antagits i detta arbete då förutsättningarna är liknande.

Den version av Heskestads plymmodell som använts i arbetet är giltig då flamhöjden är högre än brandgaslagrets höjd. I försöken som genomförts i detta arbete observerades flammor i höjd med brandgaslagret tidigt i förloppet vilket gör modellen lämplig.

För att uppskatta en flamhöjd i beräkningarna används Heskestads flamhöjdsekvation som är framtagen för pölbränder. Att applicera denna på träribbstaplarna som använts i försöken är en förenkling av verkligheten. Genom att ansätta förbränningsegenskaper för metanol erhålls en flamhöjd vid beräkningarna som ungefär stämmer överens med observationer. Metanol valdes då förbränningsegenskaperna liknar de för trä.

### 5.3.4 Yamana och Tanaka

Som en del av beräkningen för brandgaslagrets höjd ansätts ett alfa-värde för effekttillväxten. Detta redovisas mer ingående i Bilaga B. I diagrammen i bilagan framgår det att tillväxten enligt alfa-värdet inte stämmer särskilt bra överens med den faktiska effektkurvan. Överensstämmelsen är dock bättre tidigt i förloppet vilket är då metoden utvecklad av Yamana och Tanaka används, eftersom den blir ogiltig när brandgaser börjar lämna rummet. Vid dimensionering av brandskydd används sällan effektkurvor från riktiga bränder utan branden antas tillväxa enligt ett bestämt alfa-värde. Detta innebär att metoden att anta ett alfa-värde använd i detta arbete är mer anpassad för sådana ändamål än för att räkna på faktiska effektkurvor.

För rumsgeometrin som undersökts i detta arbete är tiden då metoden framtagen av Yamana och Tanaka är giltig mycket kort. Detta beror på att brandgaser börjar lämna brandrummet tidigt i förloppet. I denna del av förloppet är effekten låg och svår att mäta på ett korrekt sätt. Av denna anledning har inga slutsatser kunnat dras kring resultaten från denna beräkningsmetod. Metoden är mer intressant för utrymmen med stora takhöjder och låga öppningar, till exempel trapphus och atrium.

Då olika metoder har olika giltighetsspann är det intressant att kombinera flera beräkningsmetoder under ett förlopp. I detta arbete har metoden framtagen av Yamana och Tanaka kombinerats med metoden framtagen av Johansson et al. för att uppskatta brandgaslagrets höjd.

## 5.4 Jämförelse

Som tidigare nämnts i Avsnitt 5.1 tyder mycket på att effekttutvecklingen i försöken inte registrerades helt korrekt. Detta innebär att handberäkningar och simuleringar inte bygger på exakt den effekttutveckling som genererades av bränsleuppställningarna i försöken utan på den som uppmättes. Detta är något som måste ha i åtanke när jämförelse görs med mätvärden från experimenten. Resultaten från FDS-simuleringarna hade till exempel troligtvis stämt betydligt bättre överens med mätvärdena från experimenten om en helt korrekt effektkurva använts.

### 5.4.1 Brandgaslagrets höjd

Då höjden på brandgaslagret jämförs så är det viktigt att ha i åtanke hur brandgaslagret definieras. I experimenten och simuleringarna erhålls brandgaslagrets höjd från en datareduktion av temperaturdata medan den i handberäkningsmetoderna erhålls ur massflödeskorrelationer.

En begränsning med att ta fram en höjd på brandgaslagret med den datareduceringsmetod som använts i detta arbete är att ett "brandgaslager" uppstår så fort det finns en temperaturgradient i utrymmet. Vid reduceringen av experimentdata erhålls en höjd på brandgaslagret redan i första tidssteget eftersom rummet inte har en helt homogen temperatur. Detta stämmer inte överens med det som observerades under försöken och inte heller med vad man normalt kallar ett brandgaslager.

En jämförelse mellan de observerade höjderna på brandgaslagren, presenterade i Bilaga F, och de beräknade höjderna från datareducering och handberäkningar, presenterade i Kapitel 4 har genomförts. Jämförelsen visade att uppskattningarna från handberäkningarna stämmer bättre överens med observationerna än vad reducerad temperaturdata gör. Detta tyder på att datareduceringen inte helt speglar verkligheten.

Graferna över brandgaslagrets höjd för de olika försöksuppställningarna som redovisas i Kapitel 4 visar att utseendet på kurvorna från Johansson et al.s metod skiljer sig något från utseendet på kurvorna från datareduceringen. Höjderna som erhålls ur datareduceringen lägger sig på en jämn nivå en stund in i förloppet. Denna höjd förblir sedan ungefär densamma under resten av brandförloppet och påverkas inte nämnvärt av att brandens effekt avtar. Höjderna som erhålls från metoden utvecklad av Johansson et al. påverkas mer av effektutvecklingens utseende. Brandgaslagret trycks ner något när branden når sin maxeffekt och ökar sedan lite i höjd när effekten avtar.

### **Påverkan av försöksuppställning**

En analys av hur de olika parametrarna som angavs i syftet (öppningshöjd, väggmaterial och brandens tillväxthastighet och maxeffekt) påverkar uppskattningarna från handberäkningarna har gjorts i Bilaga E. I analysen har en jämförelse gjorts mellan försöksuppställningar som bara skils åt av en av dessa parametrar. Detta har gjorts för att belysa de olika parametrarnas påverkan på handberäkningarnas uppskattningar av brandgaslagrets höjd och temperatur. I detta avsnitt förs en diskussion om vilka slutsatser som kan dras från analysen angående uppskattningarna av brandgaslagrets höjd.

Genom att studera höjdkurvorna i Bilaga E.1 framgår det att isolering av rummet inte ger någon märkbar effekt på handberäkningarnas uppskattning av brandgaslagrets höjd.

Vid jämförelse av höjdkurvorna i Bilaga E.2 framgår det att handberäkningarna förutser brandgaslagrets höjd bäst för försöksuppställningarna med liten öppning. För försöksuppställningar med stora öppningar överskattar handberäkningarna brandgaslagrets höjd med knappt tio centimeter jämfört med experiment och simuleringar. Detta kan dock bero på att brandgaslagret inte definieras på samma sätt för handberäkningarna som för experiment och simuleringar. En annan anledning kan vara att brandgaslagret lutar mer för försöksuppställningar med stora öppningar. Detta illustreras tydligt för simuleringarna genom ett exempel i Bilaga A.3. Samma fenomen observerades även under försöken. Lutningen innebär att datareduktionen till två zoner är mer osäker för försöksuppställningar med stora öppningar jämfört med små öppningar.

I Bilaga E.3 har påverkan från brandens tillväxthastighet och maxeffekt analyserats. Ingen stor påverkan av dessa parametrar på handberäkningarnas uppskattning av brandgaslagrets höjd har identifierats.

### **5.4.2 Brandgaslagrets temperatur**

Temperaturkurvorna som presenteras i Kapitel 4 visar att handberäkningsmetoderna överskattar brandgaslagrets temperatur för de allra flesta fall jämfört med experiment och simuleringar. Metoden utvecklad av Johansson et al. är den metod som oftast överskattar temperaturen mest, för de isolerade försöksuppställningarna överskattas temperaturen kraftigt.

Det är också tydligt att temperaturkurvorna från handberäkningsmetoderna stämmer bättre överens med temperaturerna från simuleringarna än med de uppmätta temperaturerna från försöken. Även detta beror troligtvis på att effektutvecklingen i försöken inte registreras helt korrekt, något som har diskuterats tidigare. Simuleringarna och handberäkningarna bygger dock på exakt samma effektutveckling, det vill säga den uppmätta effekten från försöken, vilket gör att de erhållna temperaturkurvorna liknar varandra.

### **Påverkan av försöksuppställning**

En analys av hur de olika parametrarna som angavs i syftet (öppningshöjd, väggmaterial och brandens tillväxthastighet och maxeffekt) påverkar uppskattningarna från handberäkningarna har gjorts i Bilaga E. I analysen har en jämförelse gjorts mellan försöksuppställningar som bara skils åt av en av dessa parametrar. Detta har gjorts för att belysa de olika parametrarnas påverkan på handberäkningarnas uppskattningar av brandgaslagrets höjd och temperatur. I detta avsnitt förs en diskussion om vilka slutsatser som kan dras från analysen angående uppskattningarna av brandgaslagrets temperatur.

Jämförelse av graferna i Bilaga E visar att isolering av väggarna inte gav någon stor effekt på temperaturen som uppmättes vid experimenten. Inte heller i simuleringarna är det någon större skillnad mellan brandgastemperaturerna för försöksuppställningarna med isolerade väggar relativt de med oisolerade väggar. Däremot ger isoleringen en väldigt stor skillnad i handberäkningarna. Handberäkningar på försöksuppställningar med isolering överskattar temperaturen i brandgaslagret kraftigt, mer än för försöksuppställningar utan isolering.

I Bilaga E.2 har öppningshöjdens påverkan analyserats. För de oisolerade försöksuppställningarna kan ingen märkbar skillnad på hur väl handberäkningarna förutspår temperaturen identifieras beroende på öppningshöjden. För de isolerade försöken blir dock uppskattningarna från handberäkningarna sämre för uppställningar med liten öppning. Temperaturen överskattas betydligt mer för dessa än för uppställningar med stor öppning.

Jämförelse av graferna i Bilaga E.3 visar att temperaturen i brandgaslagret förutses något bättre för bränder med långsam tillväxthastighet och låg maxeffekt. Temperaturerna överskattas inte lika mycket för dessa bränder som för snabba bränder med högre maxeffekt.

### **5.4.3 Olika metoder för att uppskatta värmeövergångstalet**

I Bilaga D jämförs resultaten från de olika metoderna för att uppskatta värmeövergångstalet som presenterades i Avsnitt 3.3. Från jämförelserna framgår det tydligt att värmeövergångstalet är en parameter med stor inverkan på resultatet. Samtidigt är det en svår parameter att uppskatta vilket gör det till en stor potentiell felkälla.

Att ansätta ett konstant värmeövergångstal är en extrem förenkling av verkligheten. För vissa försöksuppställningar är överensstämmelsen bra men för andra underskattas temperaturen. Resultatet beror dock helt på vilket värde värmeövergångstalet ansätts till. Detta innebär att om ett konstant värde på värmeövergångstalet ansätts måste det vara väl underbyggt.

Även beräkningsmetoderna för värmeövergångstalet som presenteras i Avsnitt 3.3 är förenklingar av verkligheten. Detta framgår tydligt för försöksuppställningar med isolerade väggar där temperaturen överskattas kraftigt. I detta arbete har en begränsad uppsättning väggtypers undersökts. För till exempel en tunn metallvägg kan istället ett beräknat värmeövergångstal ge en betydligt underskattad temperatur. Detta pekar på vikten av att även då värmeövergångstalet beräknas måste en rimlighetskontroll genomföras och gärna även en känslighetsanalys.

Om en vägg består av flera material måste de termiska egenskaperna för alla material sammanvägas för att ge ett gemensamt värmeövergångstal. I Avsnitt 2.1.1 presenteras Ekvation 2.8 som är en formel för att vika samman värmeövergångstal för flera material. Formeln tar dock ingen hänsyn till i vilken ordning materialen sitter. Detta är en förenkling då ett material inte borde påverka värmetransporten förrän den termiska vågen nått materialet. Under de första sekunderna i ett förlopp spelar det ingen roll om en vägg är isolerad på utsidan eller inte eftersom den termiska vågen inte ännu passerat det innersta materialet. Ekvation 2.8 är en bättre approximation för förlopp som befinner sig i *steady-state* då värmevågen hunnit passera alla material i väggen.

Med hänsyn till denna problematik undersöktes ett alternativt sätt att beräkna värmeövergångstalet för flera material. I denna metod tas ingen hänsyn till yttre material förrän den termiska vågen nått dem. Därefter används Ekvation 2.8 för att sammanväga värmeövergångstalet för de två materialen. För försöken genomförda i detta arbete har bättre resultat erhållits från denna metod än från metoden då enbart Ekvation 2.8 används.

Vid analys av olika värden på värmeövergångstalet har det framgått att resultaten avseende brandgaslagrets temperatur från metoden utvecklad av Johansson et al. är känsligare för förändringar av värmeövergångstalet än vad MQH-metoden är. Detta skulle kunna bero på att MQH-metoden är experimentellt framtagen till skillnad från metoden av Johansson et al. som enbart bygger på teoretiska samband.

## 5.5 Allmänt

För att kontrollera brandens storlek i förhållande till utrymmet beräknades förväntad övertändningseffekt, det vill säga effekten som krävs för att nå 610 grader Celsius, med hjälp av MQH-modellen. Under försöken observerades aldrig övertändning. Den förväntade övertändningseffekten enligt MQH överskreds dock i försök 6\_3. Försök 6\_3 är också det fall där brandgaslagrets temperatur överskattas som mest av handberäkningsmetoderna. I övriga försök nådde effekten aldrig upp till den förväntade övertändningseffekten men marginalerna varierade mellan försöken.

Att försök endast har genomförts i nedskalad form innebär att felkällor i samband med skalningen kan förekomma. Det är till exempel svårt att avgöra om väggarna på det nedskalade rummet representerar en fullskalig vägg på ett bra sätt.

Endast en rumsgeometri har undersökts i arbetet. Ingen analys har gjorts för att undersöka hur flera öppningar, öppningarnas placering och andra typer av rumsgeometrier påverkar resultatet har genomförts.

## 5.6 Framtida studier

I detta avsnitt presenteras behov av framtida studier som har identifierats under arbetets gång.

En begränsning i effektmätningen i förloppets tidiga skede har identifierats i detta arbete. Då de uppmätta effektkurvorna från experimenten använd som indata till både simuleringar och handberäkningar får ett fel vid denna mätning stort genomslag i hela arbetet. En intressant studie skulle vara att i princip upprepa analysen i detta arbete, men istället för att använda träribbstaplar som bränsle använda ett gasformigt bränsle vars flöde kunde styras för att få exakt de effektkurvor som önskas. Genom att effektkurvorna alltid ser likadana ut kan jämförelserna och analysen av respektive parameters påverkan genomföras på ett bättre sätt med färre felkällor. Ett annat alternativ är att använda träribbor som bränsle men mäta massavbrinningen under försöken för att med hjälp av denna beräkna effektutvecklingen.

Skalningens påverkan har inte analyserats i detta arbete. Detta är en viktig parameter som behöver en djupare analys. I samband med detta kan experiment genomföras i full skala för att verifiera resultatens giltighet.

I detta arbete har endast försök med en huvudsaklig geometri genomförts. Ytterligare studier på geometrins påverkan på handberäkningsmetodernas applicerbarhet är önskvärt. Parametrar som är intressanta för vidare studier är bland annat öppningarnas antal, placering och storlek, rummets form och takhöjden.

Analysen i detta arbete har kommit fram till att resultatet av handberäkningarna är väldigt beroende av hur värmeförlusterna genom väggarna hanteras. Detta är ett område där djupare studier behöver genomföras. Hur hanteras till exempel rum med flera material i väggarna. Speciellt när man tittar på tillväxtfasen av en brand och den totala exponeringstiden för väggarna är låg, ska man då ta hänsyn till hela väggens tjocklek vid beräkningarna?

Endast ett fåtal handberäkningsmetoder har undersökts i detta arbete. Andra metoder som inte tagits upp bör också utvärderas. Vid inventeringen av handberäkningsmetoder identifierades en intressant metod framtagen av Evegren & Wickström (2015). Experimentuppställningen i detta arbete medgav inte att metoden testades, men metoden är intressant för framtida studier då den är framtagen för tidsberoende förlopp.

## 6 Slutsatser

I det här kapitlet dras slutsatser utifrån de frågeställningar som presenterades i Avsnitt 1.4.

*Vilka handberäkningsmetoder är lämpliga att använda för att förutsäga brandgaslagrets höjd och temperatur vid en rumsbrand?*

De metoder som har undersökts i detta arbete bedöms vara användbara verktyg för approximativa beräkningar för tidsberoende brandförlopp. De kräver dock en god förståelse för metodernas begränsningar och ingående parametrars påverkan på resultatet.

Inga slutsatser har kunnat dras om metoden utvecklad av Yamana och Tanaka på grund av begränsat giltighetsspann för undersökta försöksuppställningar. Metoden är intressantare för rum där takhöjden är stor i förhållande till öppningshöjden, till exempel atrium eller trapphus.

*Vilka parametrar har stor påverkan på resultatet?*

I detta arbete har tre parametrar i försöksuppställningen varierats. Dessa är öppningshöjd, väggarnas uppbyggnad samt brandens egenskaper.

### Öppningshöjd

Handberäkningarnas uppskattningar av brandgaslagrets höjd stämmer bäst överens med resultatet från experiment och simuleringar samt observationer från försöken för försöksuppställningarna med liten öppning. För uppställningarna med stora öppningar undersökta i detta arbete avviker uppskattningarna något från resultaten från experiment och simuleringar men stämmer väl överens med vad som observerats under försöken. Skillnader i definitionen av brandgaslagrets höjd gör det dock svårt att dra definitiva slutsatser.

För de oisolerade försöksuppställningarna kan ingen tydlig skillnad på hur väl handberäkningarna förutspår temperaturen beroende på öppningshöjden identifieras. För de isolerade försöken blir dock uppskattningarna från handberäkningarna sämre för uppställningar med liten öppning. Temperaturen överskattas betydligt mer för dessa än för uppställningar med stor öppning.

### Väggarnas uppbyggnad

Analysen visar att isolering av rummet inte ger någon märkbar effekt på handberäkningarnas uppskattning av brandgaslagrets höjd.

Handberäkningarnas uppskattningar av temperaturen i brandgaslagret indikerar att temperaturen blir betydligt högre då väggarna är isolerade. Dessa stora temperaturskillnader observeras inte i varken experiment eller simuleringar.

Analysen har visat att uppskattningarna från handberäkningarna är kraftigt beroende av hur värmeövergångstalet representeras. Värmeövergångstalet är en svår parameter att uppskatta, speciellt för väggar bestående av flera material med olika termiska egenskaper. Ett alternativt sätt att uppskatta värmeövergångstalet för sådana väggar har tagits fram i detta arbete och presenterats i denna rapport.

### Brandens egenskaper

Ingen stor påverkan av brandens tillväxthastighet och maxeffekt på handberäkningarnas uppskattning av brandgaslagrets höjd har identifierats.

Analysen visar att temperaturen i brandgaslagret förutses något bättre för bränder med långsam tillväxthastighet och låg maxeffekt än för bränder med snabb tillväxthastighet och hög maxeffekt.

*Vad ska en användare tänka på då handberäkningsmetoder används för beräkningar av tidsberoende brandförlopp?*

Användare bör:

- Ha en stor förståelse för metodernas begränsningar och ingående parametrars påverkan på resultatet. Känslighetsanalyser kan vara bra verktyg för att få denna djupare förståelse.
- Ansätta värmeövergångstalet på ett sätt som representerar verkligheten då denna parameter har stor inverkan på temperaturuppskattningar.
- Primärt använda handberäkningar för att identifiera trender då en parameters påverkan analyseras i ett undersökt utrymme eller då approximativa resultat är tillräckliga.

*Vad bör framtida forskning fokusera på för att utveckla metoderna ytterligare?*

- Bättre metoder för att hantera värmeförlusterna genom väggarna bör undersökas, då denna parameter har identifierats som avgörande för uppskattning av temperatur i brandgaslagret med undersökta handberäkningsmetoder.
- Studier av andra rumsgeometrier än den som undersökts i detta arbete. Intressanta parametrar att förändra kan vara öppningarnas antal, placering och storlek, takhöjden samt rummets form.
- Endast ett fåtal handberäkningsmetoder har undersökts i detta arbete. Andra metoder som inte tagits upp bör också utvärderas.



## Referenser

- BIV, 2013. *CFD-beräkningar med FDS*, Malmö: Föreningen för brandteknisk ingenjörsvetenskap.
- Blazek, J., 2001. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. St Augustin: Elsevier Ltd..
- Boverket, 2006. *Utrymningsdimensionering*, Huskvarna: Boverket.
- Carlsson, J., 2003. *Computational strategies in flame-spread modelling involving wooden surfaces*, Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Chabraoui, S. & Tuncer, Ü., 2013. *Energieffektiva byggnaders påverkan på CO<sub>2</sub> – utsläpp*, Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.
- Cox, G. & Kumar, S., 2002. Modeling Enclosure Fires Using CFD. i: S. o. F. P. Engineers, red. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Tredje red. Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-205 till 3-207.
- D. Walton, W. & H. Thomas, P., 2002. Estimating Temperatures in Compartment Fires. i: S. o. F. P. Engineers, red. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Tredje red. Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-171 till 3-188.
- Drysdale, D., 2011. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3 red. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Elsevier B.V., 2015. *Engineering Village*. [Online]  
Available at: <http://www.engineeringvillage.com/search/quick.url>  
[Använd 2015].
- EPRI, NIST, NRC-RES, SAIC, 2007. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 3*, Rockville: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES) and Electric Power Research Institute (EPRI).
- European Committee for Standardisation, 2002. *CEN , EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, Bryssel: European Committee for Standardisation.
- Evegren, F. & Wickström, U., 2015. New approach to estimate temperatures in pre-flashover fires: Lumped heat case. *Fire Safety Journal*, Volym 72, pp. 77-86.
- Johansson, N., 2015. *Fire Dynamics of Multi-Room Compartment Fires*, Lund: Media Tryck.
- Johansson, N., Svensson, S. & van Hees, P., 2015. An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires. *Fire Safety Journal*.
- Karlsson, B. & Quintiere, G. J., 1999. *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- McGrattan, K. o.a., 2015. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology.
- NIST, 2014. *User's Guide for Smokeview Version 6 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data*, u.o.: National Institute of Standards and Technology.
- PAROC, 2015. *Paroc GRS 30*. [Online]  
Available at:  
<http://www.paroc.se/ParocInternet/Layouts/PdfPrintPathInfoExtended/PdfGeneratorFolder/Storage/Produ>

[ctPrint.aspx/paroc-grs-30.pdf?id={37FB5512-CA6E-4CDF-B17E-29E685D65F48}&t=pdf](http://ctPrint.aspx/paroc-grs-30.pdf?id={37FB5512-CA6E-4CDF-B17E-29E685D65F48}&t=pdf)  
[Använd 18 11 2015].

PAROC, 2015. *Produkter Byggisolering*. Skövde: Paroc group.

Persson, M., 2015. *Miljöcertifierade byggnader: Hur påverkas brandskyddet?*, Lund: Lunds Tekniska Högskola.

Promat, 2013. *Brandskydd av stålkonstruktioner*. 03-2013 red. Rödekro: Promat.

SFPE, NFPA, 2002. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition red. Quincy: National Fire Protection Association.

SFS 2003:778, 2003. *Lag om skydd mot olyckor*, Stockholm: Försvarsdepartementet.

SP Technical Research Institute of Sweden, 2015. *ISO 9705 - Room Corner Test*. [Online]

Available at:

[http://www.sp.se/en/index/services/firetest\\_building/firetest\\_bu%C3%ADding/iso\\_9705\\_room\\_corner\\_test/Sidor/default.aspx](http://www.sp.se/en/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADding/iso_9705_room_corner_test/Sidor/default.aspx)

[Använd 17 November 2015].

Thunderhead, 2015. *PyroSim Fire Dynamics and Smoke Control*. [Online]

Available at: <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>

[Använd 3 November 2015].

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Experimental Uncertainty*, Rockville: Office of Nuclear Regulatory Research.

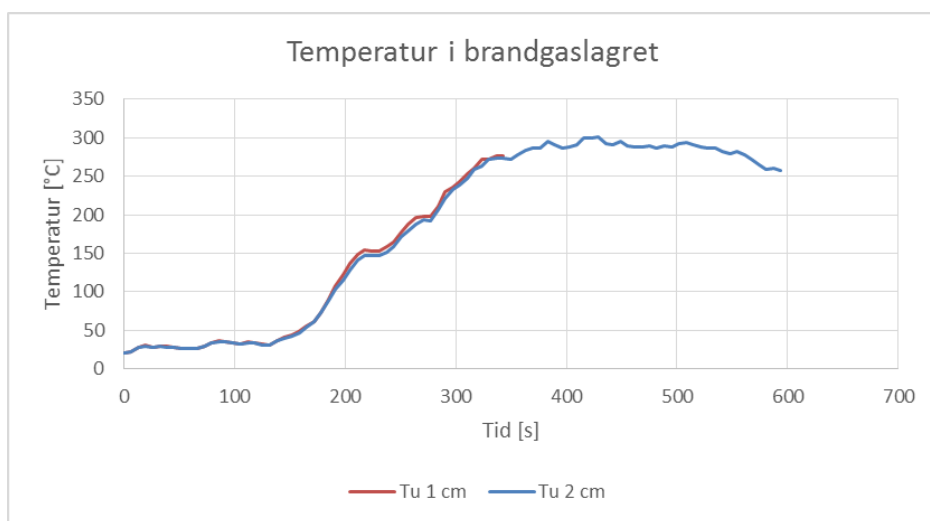
## Bilaga A FDS-simuleringar

I denna bilaga presenteras först en nodkonvergensanalys och därefter redovisas den indata som använts vid FDS-simuleringarna. I sista delen av bilagan redovisas också skillnaden i brandgaslagrets utseende beroende på öppningsstorlek.

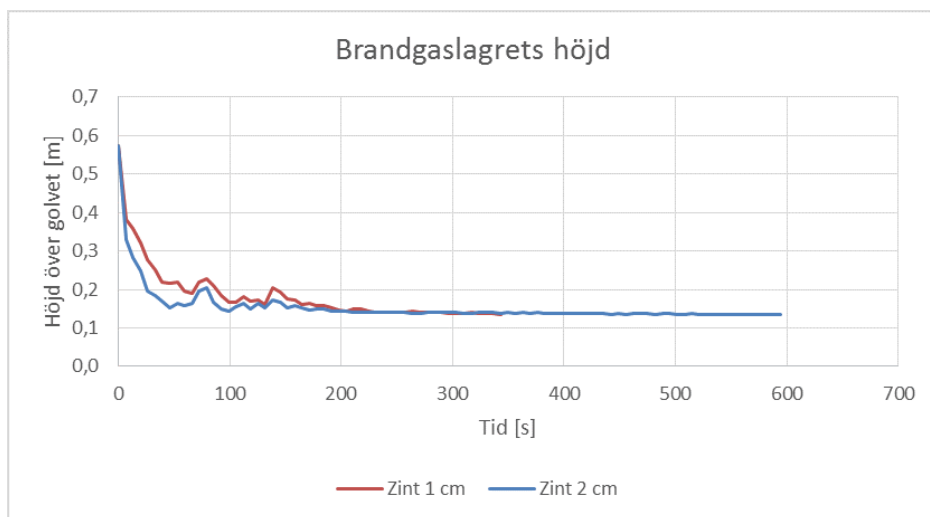
### A.1 Nodkonvergens

Nedan redovisas jämförelser mellan resultaten som erhöles från simuleringar av försöksuppställning 5 med två olika gridupplösningar. Gridupplösningarna som jämförs är två centimeter, som användes för simuleringarna som presenterats tidigare i rapporten, samt en finare upplösning på en centimeter. Simuleringen med en centimeters upplösning kördes endast drygt 340 sekunder av förloppet på grund av den mycket långa simuleringstiden. En rättvisande analys ansågs vara genomförbar trots att inte hela förloppet simulerats med den finare upplösningen.

Resultatet som presenteras i Figur A.1 och Figur A.2 visar att skillnaderna mellan de olika gridupplösningarna är mycket små och nodkonvergens anses vara nådd.



Figur A.1: Temperaturen i brandgaslagret som tagits fram med hjälp av en datareducering för de båda gridupplösningarna.



Figur A.2: Höjden på brandgaslagret som tagits fram med hjälp av en datareducering för de båda gridupplösningarna.

## A.2 Indata FDS

### A.2.1 Fullständig indatafil

Nedan följer indatafilen för simuleringen av försöksuppställning 1 (stor öppning, långsam brand, ej isolerad) med två centimeters gridupplösning. Effektkurvan som används är den som uppmättes vid försök 1\_1.

1\_1\_2cm.fds

Generated by PyroSim - Version 2015.3.0810

2015-okt-29 18:26:22

&HEAD CHID='1\_1\_2cm/'

&TIME T\_END=700.0/

&DUMP RENDER\_FILE='1\_1\_2cm.ge1', COLUMN\_DUMP\_LIMIT=.TRUE., DT\_RESTART=100.0/

&MESH ID='MESH-b-a', IJK=40,15,40, XB=0.0,0.8,-0.04,0.26,0.0,0.8/

&MESH ID='MESH-b-b', IJK=40,20,40, XB=0.0,0.8,0.26,0.66,0.0,0.8/

&MESH ID='MESH-b-c', IJK=40,20,40, XB=0.0,0.8,0.66,1.06,0.0,0.8/

&MESH ID='MESH-b-d', IJK=40,8,40, XB=0.0,0.8,1.06,1.22,0.0,0.8/

&REAC ID='TRÄ',

FUEL='REAC\_FUEL',

C=3.4,

H=6.2,

O=2.5,

CO\_YIELD=0.005,

SOOT\_YIELD=0.015,

HEAT\_OF\_COMBUSTION=1.7E4/

&DEVC ID='THCP3\_1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.12/

&DEVC ID='THCP3\_2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.18/

&DEVC ID='THCP3\_3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.24/

&DEVC ID='THCP3\_4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.3/

&DEVC ID='THCP3\_5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.36/

&DEVC ID='THCP3\_6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.42/

&DEVC ID='THCP3\_7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.48/

&DEVC ID='THCP2\_1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.12/

&DEVC ID='THCP2\_2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.18/

&DEVC ID='THCP2\_3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.24/

&DEVC ID='THCP2\_4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.3/

&DEVC ID='THCP2\_5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.36/

&DEVC ID='THCP2\_6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.42/

&DEVC ID='THCP2\_7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.48/

&DEVC ID='THCP2\_8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.54/

&DEVC ID='THCP2\_9', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.15,0.85,0.6/

&DEVC ID='THCP1\_1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.12/

&DEVC ID='THCP1\_2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.18/

&DEVC ID='THCP1\_3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.24/

&DEVC ID='THCP1\_4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.3/

&DEVC ID='THCP1\_5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.36/

&DEVC ID='THCP1\_6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.42/

&DEVC ID='THCP1\_7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.48/

&DEVC ID='THCP1\_8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.54/

&DEVC ID='THCP1\_9', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.65,0.05,0.6/

&DEVC ID='Träd 1 layer->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=0.65,0.65,0.05,0.05,0.02,0.62/

&DEVC ID='Träd 1 layer->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE', XB=0.65,0.65,0.05,0.05,0.02,0.62/

&DEVC ID='Träd 2 layer->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT', XB=0.15,0.15,0.85,0.85,0.02,0.62/

&DEVC ID='Träd 2 layer->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE', XB=0.15,0.15,0.85,0.85,0.02,0.62/

&DEVC ID='FLOW\_ut\_låg', QUANTITY='MASS FLOW +', XB=0.25,0.55,0.9,0.9,0.02,0.27/

&DEVC ID='FLOW\_in\_låg', QUANTITY='MASS FLOW -', XB=0.25,0.55,0.9,0.9,0.02,0.27/

```

&DEVC ID='FLOW_in_hög', QUANTITY='MASS FLOW -', XB=0.25,0.55,0.9,0.9,0.02,0.52/
&DEVC ID='FLOW_ut_hög', QUANTITY='MASS FLOW +', XB=0.25,0.55,0.9,0.9,0.02,0.52/
&MATL ID='PROMATECT',
  SPECIFIC_HEAT=1.13,
  CONDUCTIVITY=0.175,
  DENSITY=870.0/
&MATL ID='STENULL',
  SPECIFIC_HEAT=0.8,
  CONDUCTIVITY=0.037,
  DENSITY=130.0/

&SURF ID='PROMATECT TAK',
  MATL_ID="PROMATECT",
  BACKING="EXPOSED",
  THICKNESS=0.024/
&SURF ID='PROMATECT',
  MATL_ID="PROMATECT",
  THICKNESS=0.012,
  BACKING="EXPOSED"/
&SURF ID='1_1_stor,långsam,ej_iso',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=605.098,
  RAMP_Q='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q'/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0110425/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=5.0, F=0.00390599/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=10.0, F=0.0182493/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=15.0, F=0.0213734/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=20.0, F=0.00584435/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=25.0, F=0.0109136/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=30.0, F=0.00576759/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=35.0, F=0.00121427/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=40.0, F=0.0211636/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=45.0, F=0.0194186/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=50.0, F=0.00488206/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=55.0, F=0.0205855/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=60.0, F=0.0321882/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=65.0, F=0.0267776/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=70.0, F=0.0106797/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=75.0, F=0.00356822/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=80.0, F=0.010238/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=85.0, F=0.0299777/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=90.0, F=0.0322358/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=95.0, F=0.0390454/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=100.0, F=0.0349607/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=105.0, F=0.0241584/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=110.0, F=0.0214477/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=115.0, F=0.0305771/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=120.0, F=0.0359982/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=125.0, F=0.050421/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=130.0, F=0.0667054/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=135.0, F=0.0650063/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=140.0, F=0.0569561/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=145.0, F=0.057672/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=150.0, F=0.0499923/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=155.0, F=0.0440152/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=160.0, F=0.0420183/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=165.0, F=0.0392346/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=170.0, F=0.0516007/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=175.0, F=0.0614428/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=180.0, F=0.0542136/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=185.0, F=0.0674936/
&RAMP ID='1_1_stor,långsam,ej_iso_RAMP_Q', T=190.0, F=0.0732307/

```

&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=195.0, F=0.0557296/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=200.0, F=0.0754901/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=205.0, F=0.0630643/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=210.0, F=0.0783861/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=215.0, F=0.0748084/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=220.0, F=0.0799677/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=225.0, F=0.0821626/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=230.0, F=0.086553/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=235.0, F=0.0945328/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=240.0, F=0.130474/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=245.0, F=0.14766/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=250.0, F=0.166994/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=255.0, F=0.189565/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=260.0, F=0.18272/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=265.0, F=0.189479/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=270.0, F=0.190609/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=275.0, F=0.18776/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=280.0, F=0.192214/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=285.0, F=0.206496/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=290.0, F=0.225587/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=295.0, F=0.289201/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=300.0, F=0.32723/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=305.0, F=0.375649/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=310.0, F=0.387602/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=315.0, F=0.400618/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=320.0, F=0.410906/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=325.0, F=0.369065/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=330.0, F=0.368386/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=335.0, F=0.404611/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=340.0, F=0.418601/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=345.0, F=0.43011/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=350.0, F=0.441749/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=355.0, F=0.492619/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=360.0, F=0.510506/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=365.0, F=0.515887/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=370.0, F=0.51745/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=375.0, F=0.531113/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=380.0, F=0.541451/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=385.0, F=0.595329/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=390.0, F=0.620921/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=395.0, F=0.613876/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=400.0, F=0.652897/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=405.0, F=0.714302/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=410.0, F=0.753785/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=415.0, F=0.820458/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=420.0, F=0.783358/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=425.0, F=0.738588/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=430.0, F=0.713631/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=435.0, F=0.699371/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=440.0, F=0.793441/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=445.0, F=0.85098/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=450.0, F=0.859456/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=455.0, F=0.833788/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=460.0, F=0.7955/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=465.0, F=0.802886/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=470.0, F=0.830677/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=475.0, F=0.800471/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=480.0, F=0.802924/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=485.0, F=0.838934/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=490.0, F=0.868507/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=495.0, F=0.88287/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=500.0, F=0.890856/

&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=505.0, F=0.856099/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=510.0, F=0.863781/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=515.0, F=0.821219/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=520.0, F=0.840638/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=525.0, F=0.852096/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=530.0, F=0.878319/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=535.0, F=0.893761/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=540.0, F=0.940325/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=545.0, F=0.912585/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=550.0, F=0.889345/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=555.0, F=0.88768/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=560.0, F=0.894626/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=565.0, F=0.906026/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=570.0, F=0.937239/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=575.0, F=1.0/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=580.0, F=0.986075/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=585.0, F=0.967632/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=590.0, F=0.914296/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=595.0, F=0.886427/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=600.0, F=0.864439/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=605.0, F=0.865317/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=610.0, F=0.866182/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=615.0, F=0.859243/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=620.0, F=0.845989/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=625.0, F=0.841064/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=630.0, F=0.864872/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=635.0, F=0.856822/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=640.0, F=0.794216/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=645.0, F=0.752416/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=650.0, F=0.745773/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=655.0, F=0.770188/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=660.0, F=0.776528/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=665.0, F=0.766683/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=670.0, F=0.755521/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=675.0, F=0.782299/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=680.0, F=0.763739/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=685.0, F=0.705484/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=690.0, F=0.69225/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=695.0, F=0.675898/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=700.0, F=0.69489/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=705.0, F=0.671599/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=710.0, F=0.610252/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=715.0, F=0.60085/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=720.0, F=0.55979/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=725.0, F=0.549982/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=730.0, F=0.569765/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=735.0, F=0.564666/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=740.0, F=0.56405/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=745.0, F=0.546814/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=750.0, F=0.545709/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=755.0, F=0.537183/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=760.0, F=0.528831/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=765.0, F=0.514677/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=770.0, F=0.51645/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=775.0, F=0.514788/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=780.0, F=0.507151/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=785.0, F=0.494974/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=790.0, F=0.479204/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=795.0, F=0.48473/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=800.0, F=0.468076/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=805.0, F=0.468525/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=810.0, F=0.465966/

&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=815.0, F=0.44457/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=820.0, F=0.465529/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=825.0, F=0.457667/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=830.0, F=0.459321/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=835.0, F=0.481919/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=840.0, F=0.487397/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=845.0, F=0.501391/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=850.0, F=0.519238/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=855.0, F=0.499451/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=860.0, F=0.47605/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=865.0, F=0.486125/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=870.0, F=0.488748/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=875.0, F=0.507633/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=880.0, F=0.511565/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=885.0, F=0.504791/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=890.0, F=0.491386/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=895.0, F=0.485949/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=900.0, F=0.431237/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=905.0, F=0.420309/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=910.0, F=0.418848/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=915.0, F=0.428664/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=920.0, F=0.425705/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=925.0, F=0.416089/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=930.0, F=0.390871/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=935.0, F=0.379431/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=940.0, F=0.37606/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=945.0, F=0.385815/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=950.0, F=0.371457/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=955.0, F=0.368226/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=960.0, F=0.35385/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=965.0, F=0.340128/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=970.0, F=0.347385/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=975.0, F=0.33956/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=980.0, F=0.338211/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=985.0, F=0.339816/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=990.0, F=0.295985/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=995.0, F=0.284157/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=1000.0, F=0.268749/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=1005.0, F=0.262004/  
&RAMP ID='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso\_RAMP\_Q', T=1010.0, F=0.296661/

&OBST XB=0.08,0.72,-0.02,0.92,0.0,0.02, SURF\_ID='PROMATECT TAK', TEXTURE\_ORIGIN=0.08,-0.02,0.0/ golv  
&OBST XB=0.08,0.72,-0.02,0.92,0.62,0.64, SURF\_ID='PROMATECT TAK', TEXTURE\_ORIGIN=0.08,-0.02,0.62/ tak  
&OBST XB=0.08,0.72,-0.02,0.0,0.02,0.62, SURF\_ID='PROMATECT'/ vägg bak  
&OBST XB=0.55,0.72,0.9,0.92,0.02,0.62, SURF\_ID='PROMATECT'/ vägg fram  
&OBST XB=0.08,0.25,0.9,0.92,0.02,0.62, SURF\_ID='PROMATECT'/ vägg fram  
&OBST XB=0.08,0.1,0.0,0.9,0.02,0.62, COLOR='INVISIBLE', SURF\_ID='PROMATECT'/ vägg sida  
&OBST XB=0.7,0.72,0.0,0.9,0.02,0.62, SURF\_ID='PROMATECT'/ vägg sida  
&OBST XB=0.32,0.48,0.36,0.52,0.02,0.1, SURF\_IDS='1\_1\_stor,långsam,ej\_iso','INERT','INERT'/ brand  
&OBST XB=0.25,0.55,0.9,0.92,0.52,0.62, SURF\_ID='PROMATECT'/ stor öppning

&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,-0.04,0.26,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-a [XMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,-0.04,0.26,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-a [XMIN]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,-0.04,-0.04,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-a [YMIN]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,-0.04,0.26,0.8,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-a [ZMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,0.26,0.66,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-b [XMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.26,0.66,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-b [XMIN]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,0.26,0.66,0.8,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-b [ZMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,0.66,1.06,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-c [XMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.66,1.06,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-c [XMIN]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,0.66,1.06,0.8,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-c [ZMAX]  
&VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,1.06,1.22,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-d [XMAX]



```
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,1.06,1.22,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-d [XMIN]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,1.22,1.22,0.0,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-d [YMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.8,1.06,1.22,0.8,0.8/ Mesh Vent: MESH-b-d [ZMAX]
```

```
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
```

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.44/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.91/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.91/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.4/
```

```
&DEVC ID='flamtemperatur_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS='MAX',
XB=0.22,0.58,0.26,0.62,0.02,0.62/
&DEVC ID='träd1_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS='MAX', XB=0.6,0.7,0.0,0.1,0.02,0.62/
&DEVC ID='träd2_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS='MAX', XB=0.1,0.2,0.8,0.9,0.02,0.62/
```

```
&TAIL /
```

## A.2.2 Variationer i indata

Med utgång i indatafilen som presenterats i A.2.1 behöver ett antal rader ändras när indata ska anpassas för de olika försöksuppställningarna. När en försöksuppställning med liten öppning ska simuleras måste följande rader användas istället för motsvarande rader i indata för uppställning ett.

```
&DEVC ID='THCP3_4L', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.07/
&DEVC ID='THCP3_5L', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.12/
&DEVC ID='THCP3_6L', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.18/
&DEVC ID='THCP3_7L', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.31,0.91,0.24/
&OBST XB=0.25,0.55,0.9,0.92,0.27,0.62, SURF_ID='PROMATECT'/ liten öppning
```

Vid simulering av uppställningar med isolerade väggar har följande MATL- och SURF-rader använts och applicerats på respektive väggar/ytor.

```
&MATL ID='PROMATECT',
SPECIFIC_HEAT=1.13,
CONDUCTIVITY=0.175,
DENSITY=870.0/
&MATL ID='STENULL',
SPECIFIC_HEAT=0.8,
CONDUCTIVITY=0.037,
DENSITY=130.0/
&SURF ID='PROMATECT TAK',
MATL_ID='PROMATECT',
BACKING="EXPOSED",
THICKNESS=0.024/
&SURF ID='iso-tak_inside',
RGB=102,255,255,
MATL_ID(1,1)=PROMATECT',
MATL_ID(2,1)=STENULL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
THICKNESS(1:2)=0.024,0.05,
BACKING="EXPOSED"/
&SURF ID='iso-tak_outside',
RGB=102,153,255,
MATL_ID(1,1)=STENULL',
MATL_ID(2,1)=PROMATECT',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
```

```

MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
THICKNESS(1:2)=0.05,0.024,
BACKING="EXPOSED"/
&SURF ID='PROMATECT',
MATL_ID='PROMATECT',
THICKNESS=0.012,
BACKING="EXPOSED"/
&SURF ID='iso-vägg_utsida',
RGB=102,153,255,
MATL_ID(1,1)='STENULL',
MATL_ID(2,1)='PROMATECT',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
THICKNESS(1:2)=0.05,0.012,
BACKING="EXPOSED"/
&SURF ID='iso-vägg_inside',
RGB=102,255,255,
MATL_ID(1,1)='PROMATECT',
MATL_ID(2,1)='STENULL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
THICKNESS(1:2)=0.012,0.05,
BACKING="EXPOSED"/

```

För att kontrollera nodkonvergens kördes en simulering med en dubbelt så bra gridupplösning, det vill säga med en cellstorlek på en centimeter. För att skapa den finare gridupplösningen behöver en ny MESH skapas. Detta görs med raderna nedan. Innan simuleringen körs måste även alla väggar göras om så att de blir en cm tjocka för att FDS ska behandla värmeledningen genom väggen på rätt sätt.

```

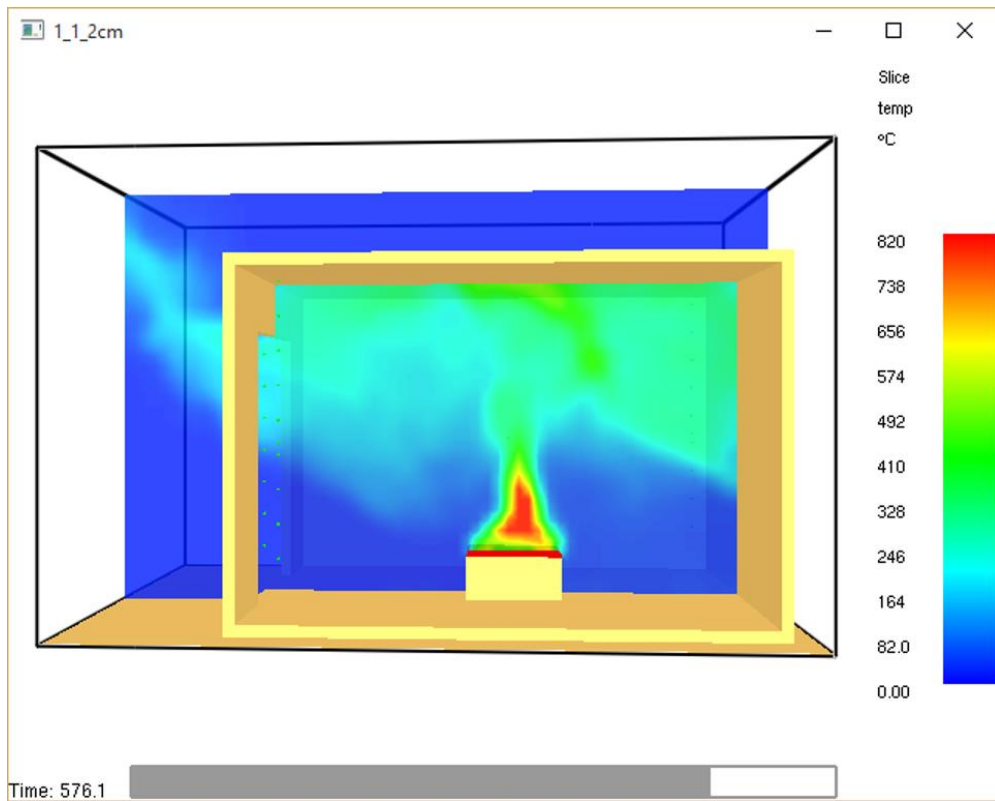
&MESH ID='MESH-b-a', IJK=40,15,40, XB=0.0,0.8,-0.04,0.26,0.0,0.8/
&MESH ID='MESH-b-b', IJK=40,20,40, XB=0.0,0.8,0.26,0.66,0.0,0.8/
&MESH ID='MESH-b-c', IJK=40,20,40, XB=0.0,0.8,0.66,1.06,0.0,0.8/
&MESH ID='MESH-b-d', IJK=40,8,40, XB=0.0,0.8,1.06,1.22,0.0,0.8/

```

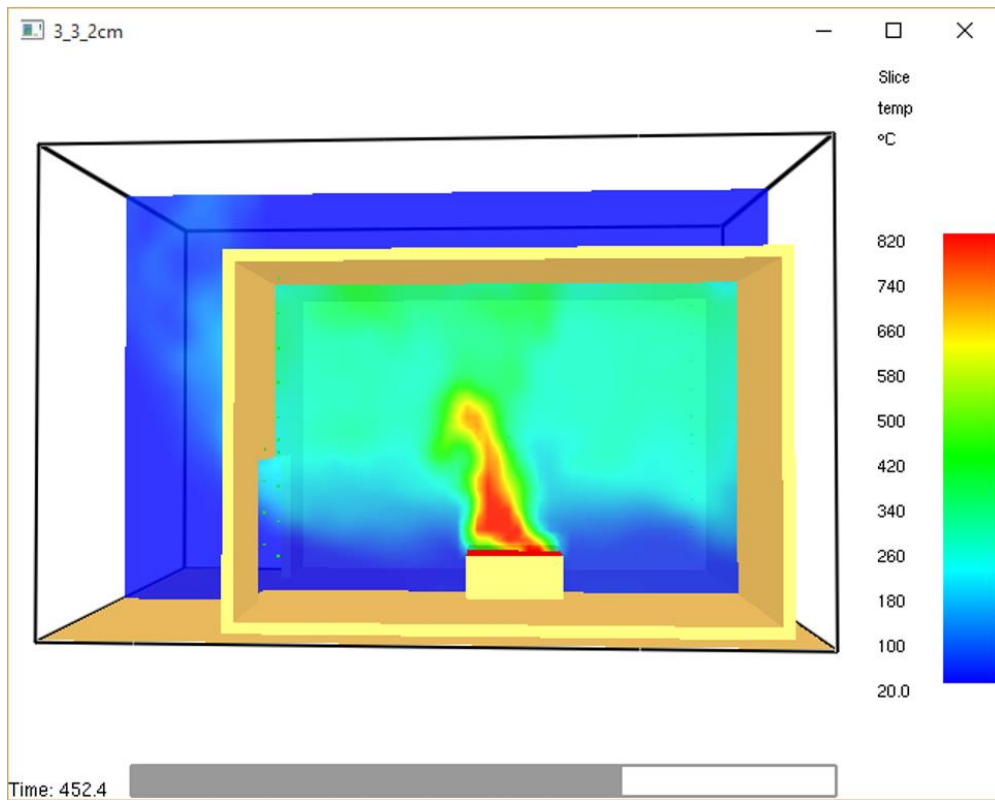
### A.3 Brandgaslagrets utseende beroende på öppningshöjd

Figur A.3 och Figur A.4 visar ett exempel på hur brandgaslagrets utseende påverkas av öppningsstorleken. Figurerna visar ögonblicksbilder men liknande tendenser kan urskiljas under hela förloppet. Det enda som skiljer försöksupställning 1 och 3 är öppningsstorleken.

I figurerna framgår det att en stor öppning ger ett mindre jämnt gränsskikt till brandgaslagret, längst in i rummet är lagret lägre och nära öppningen är det högre. Detta gör jämförelser med resultat från handberäkningar osäkrare än för försöksupställningar med liten öppning, eftersom handberäkningarna antar indelning i två homogena zoner med ett horisontalt gränsskikt. Figurerna visar även på osäkerheten i antagandet om två homogena zoner då det är tydligt att temperaturerna varierar inom skikten.



Figur A.3: Bilden visar en slice-file över temperaturen vid tidpunkten för maxeffekt i simuleringen av försöksupställning 1.



Figur A.4: Bilden visar en slice-file över temperaturen vid tidpunkten för maxeffekt i simuleringen av försöksupställning 3.



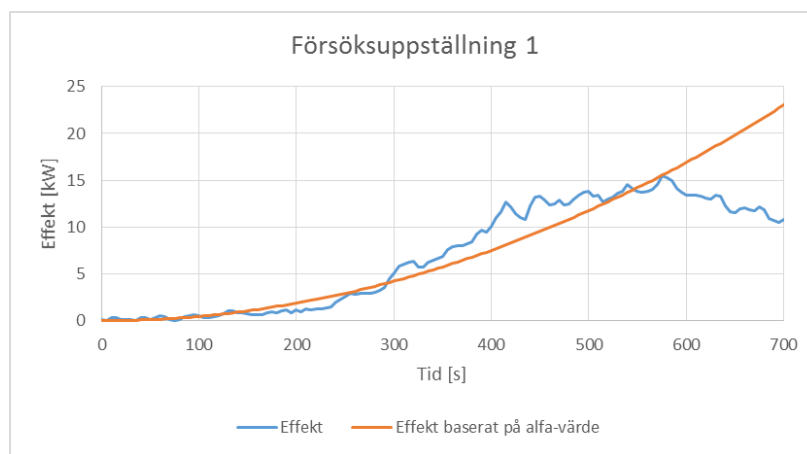
## Bilaga B Beräkning av $\alpha$ -värde för Yamana och Tanaka

I Avsnitt 3.4 presenteras hur Yamana och Tanakas beräkningsmetod för att uppskatta brandgaslagrets höjd i en brand används i detta arbete. Ett steg i beräkningen är att anta ett  $\alpha$ -värde som beskriver hur effektutvecklingen förhåller sig till tiden. Detta görs med hjälp av Ekvation 3.1 och presenteras i Tabell B.1 nedan.

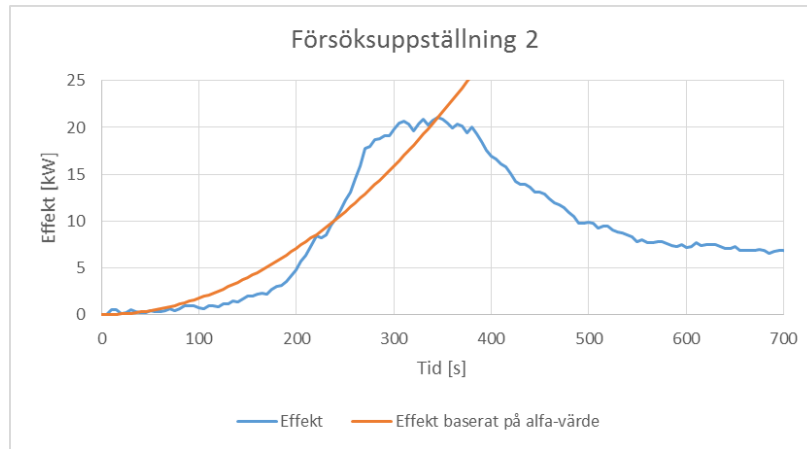
Tabell B.1: Beräknat alfa-värde för respektive försöksuppställning.

Försöksuppställning	$\alpha$ -värde [ $\text{kW/s}^2$ ]	Öppning	Isolering	Bränslekonfiguration
1	0,000047	Stor	Nej	Långsam
2	0,000177	Stor	Nej	Snabb
3	0,000047	Liten	Nej	Långsam
4	0,000079	Liten	Nej	Snabb
5	0,000072	Liten	Ja	Långsam
6	0,000226	Liten	Ja	Snabb
7	0,000072	Stor	Ja	Långsam
8	0,000298	Stor	Ja	Snabb

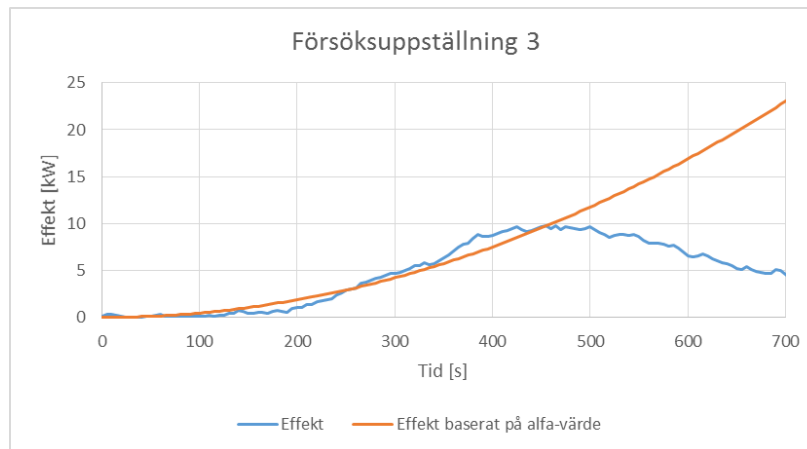
Figur B.1 till Figur B.8 nedan visar hur den antagna effektkurvan skiljer sig från den faktiska effektkurvan vid respektive försöksuppställning. Notera att metoden framtagen av Yamana och Tanaka endast används fram till att brandgaser börjar lämna rummet. Detta sker tidigt i brandförloppet vilket innebär att endast den allra första delen av den antagna effektkurvan faktiskt används.



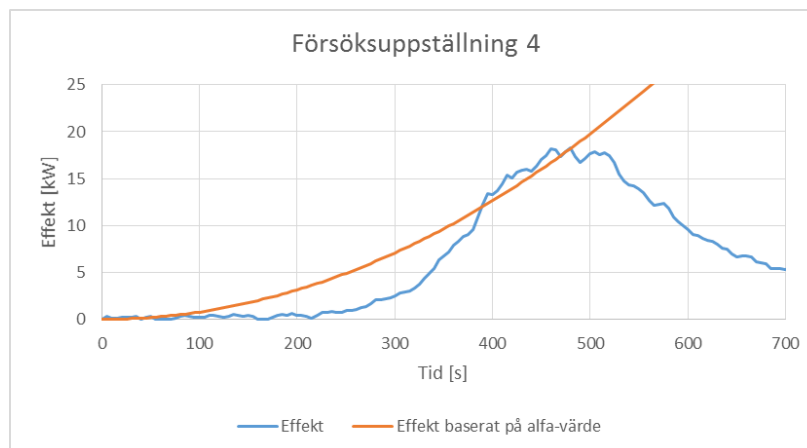
Figur B.1: Effekttvecklingen som en funktion av tiden för försöksuppställning 1. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



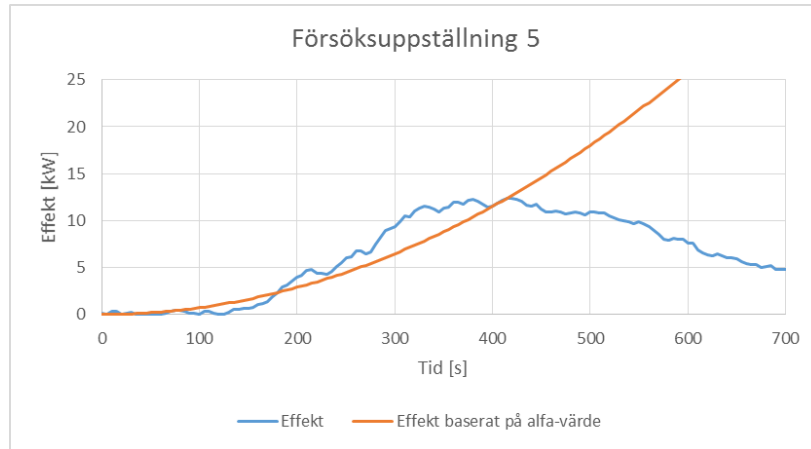
Figur B.2: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksupställning 2. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



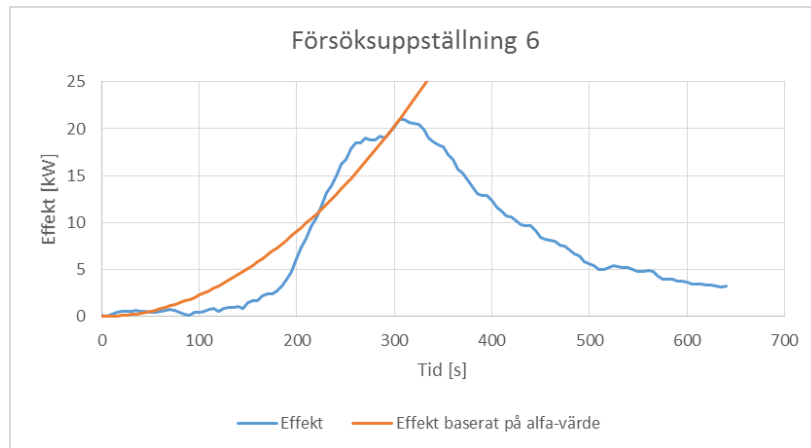
Figur B.3: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksupställning 3. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



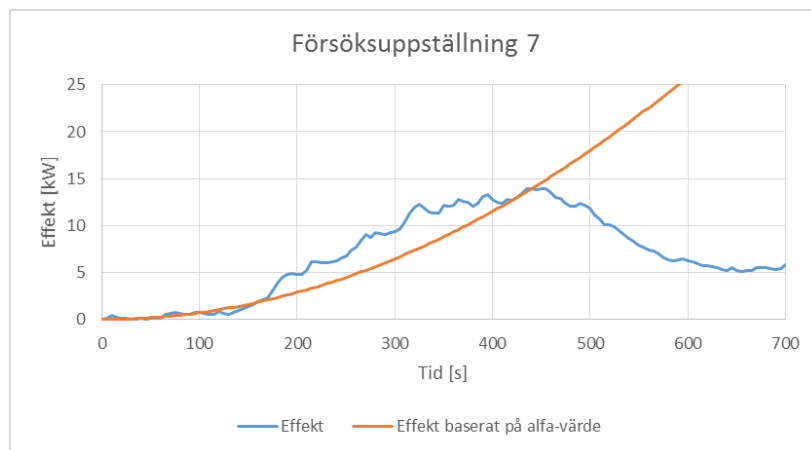
Figur B.4: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksupställning 4. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



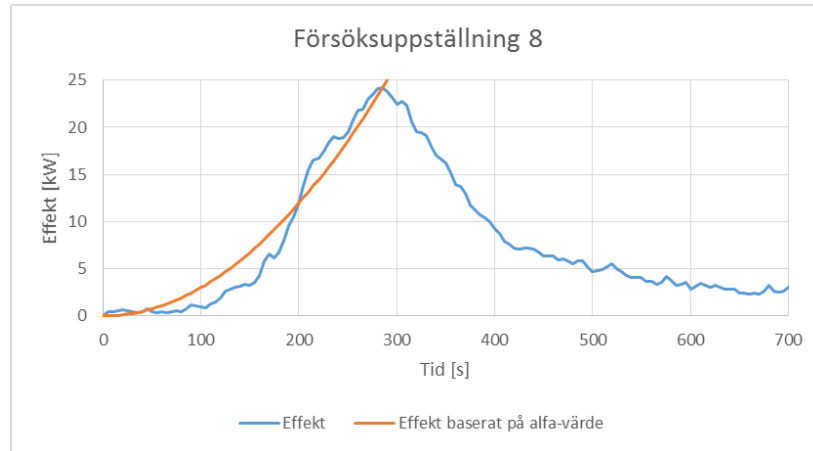
Figur B.5: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksuppställning 5. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



Figur B.6: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksuppställning 6. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



Figur B.7: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksuppställning 7. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



Figur B.8: Effektutvecklingen som en funktion av tiden för försöksupställning 8. Figuren visar både den faktiska effektkurvan vid försöket och den antagna effektkurvan vid beräkningen av brandgaslagrets höjd med Yamana och Tanakas metod.



## Bilaga C Resultat experiment

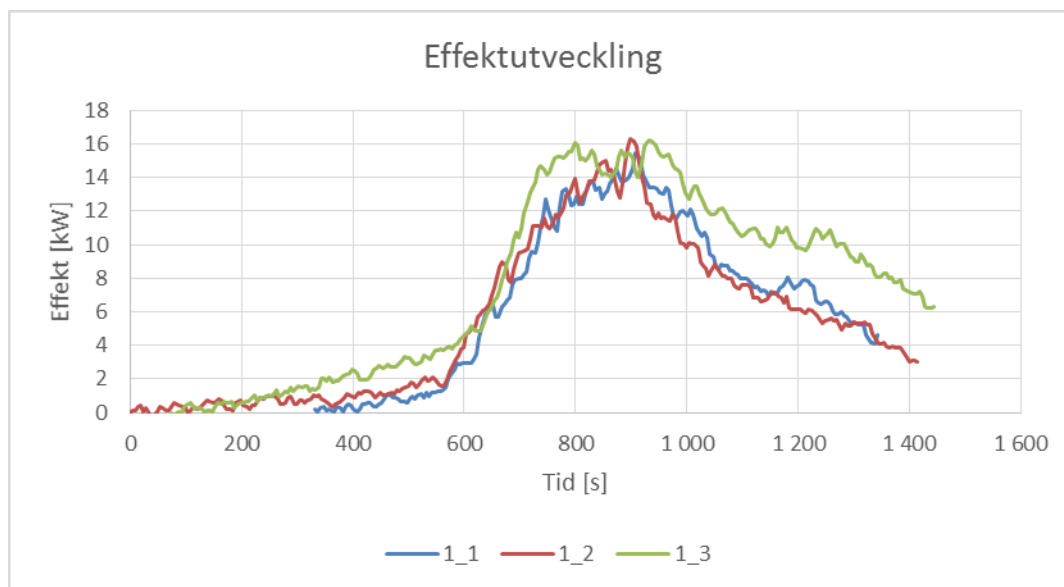
I denna bilaga presenteras resultaten från experimenten i form av uppmätta effektkurvor och temperaturer för de tre repetitionerna av de olika försöksuppställningarna. Temperaturerna som presenteras kommer från termoelement 2\_5 och 2\_9 som sitter på träd två. Termoelementträd två var placerat i hörnet mot öppningen under experimenten och termoelement 2\_5 och 2\_9 sitter på en höjd av 34 centimeter respektive 58 centimeter.

För att lättare kunna jämföra effektkurvornas utseende har de förskjutits i tiden så att tillväxtfasen i de olika försöken överlappar varandra. Temperaturkurvorna har sedan förskjutits lika mycket.

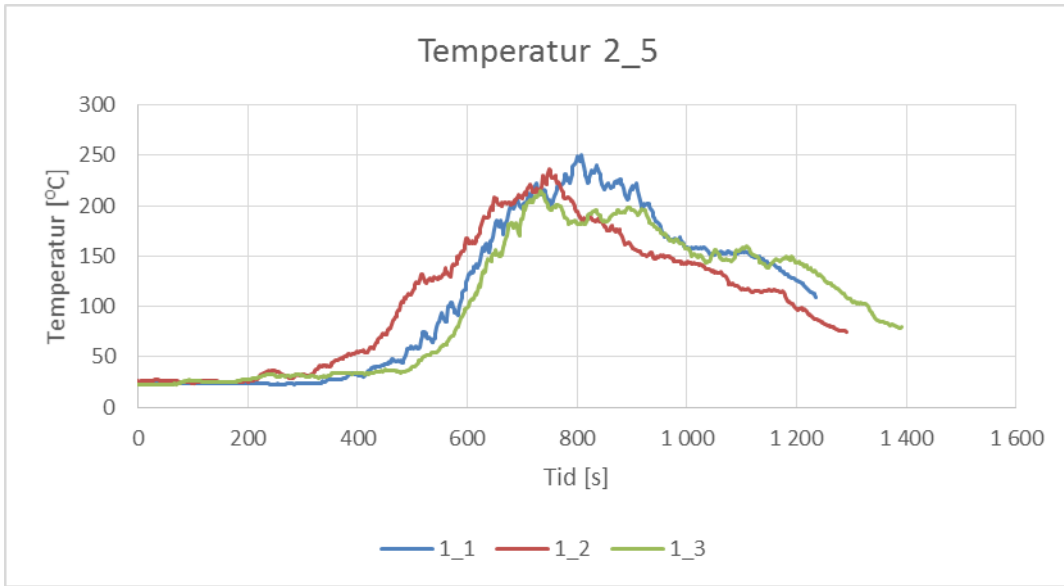
I slutet av bilagan undersöks variationer mellan försöken på två försöksuppställningar, en med snabb brand och en med långsam brand.

### C.1 Försöksuppställning 1 – långsam brand, stor öppning, oisolerad

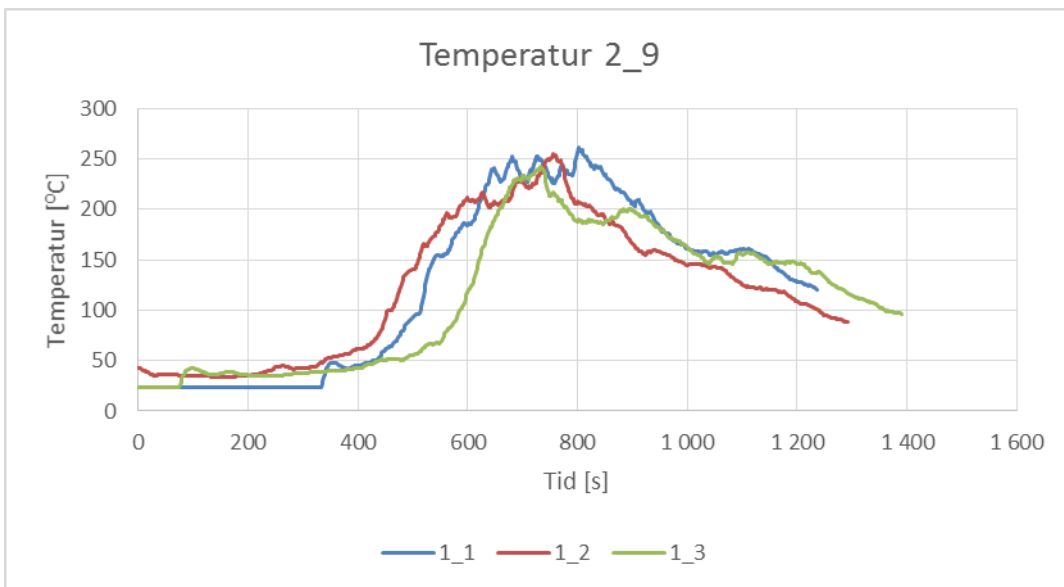
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 1. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 1\_1.



Figur C.1: Den uppmätta effektutvecklingen för de tre försöken med uppställning 1. Kurvorna är förskjutna så att tillväxtfasen ska överlappa för att underlätta jämförelse mellan kurvorna.



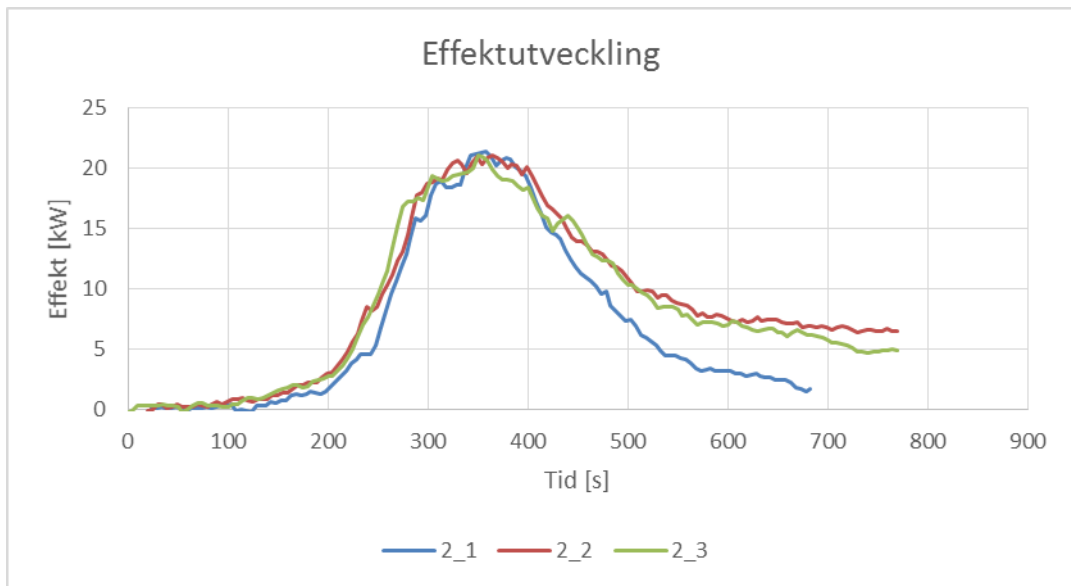
Figur C.2: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 1. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



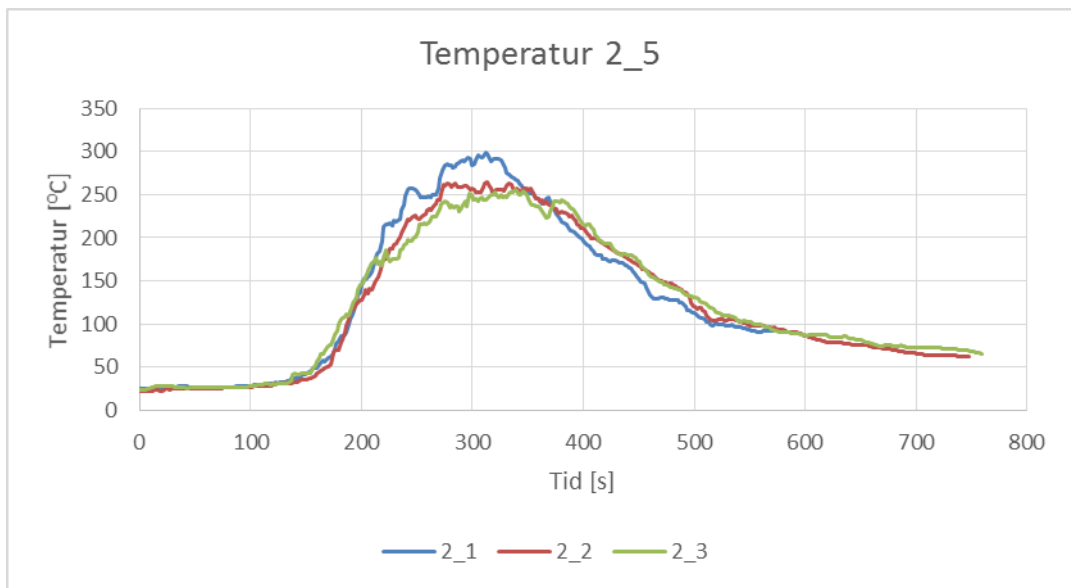
Figur C.3: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 1. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

## C.2 Försöksuppställning 2 – snabb brand, stor öppning, oisolerad

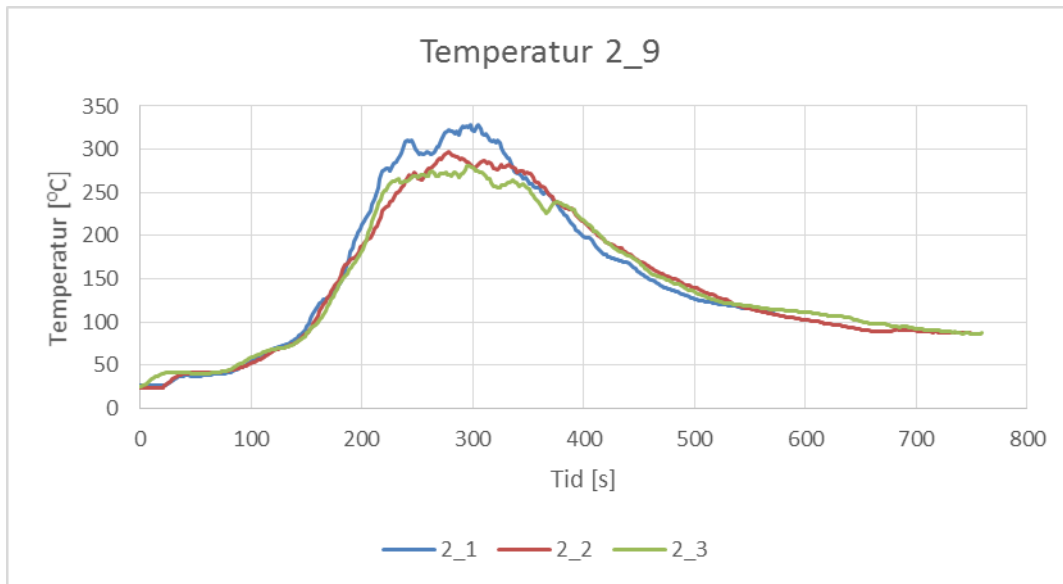
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 2. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 2\_2.



Figur C.4: Den uppmätta effektutvecklingen för de tre försöken med uppställning 2. Kurvorna är förskjutna så att tillväxtfasen ska överlappa för att underlätta jämförelse mellan kurvorna.



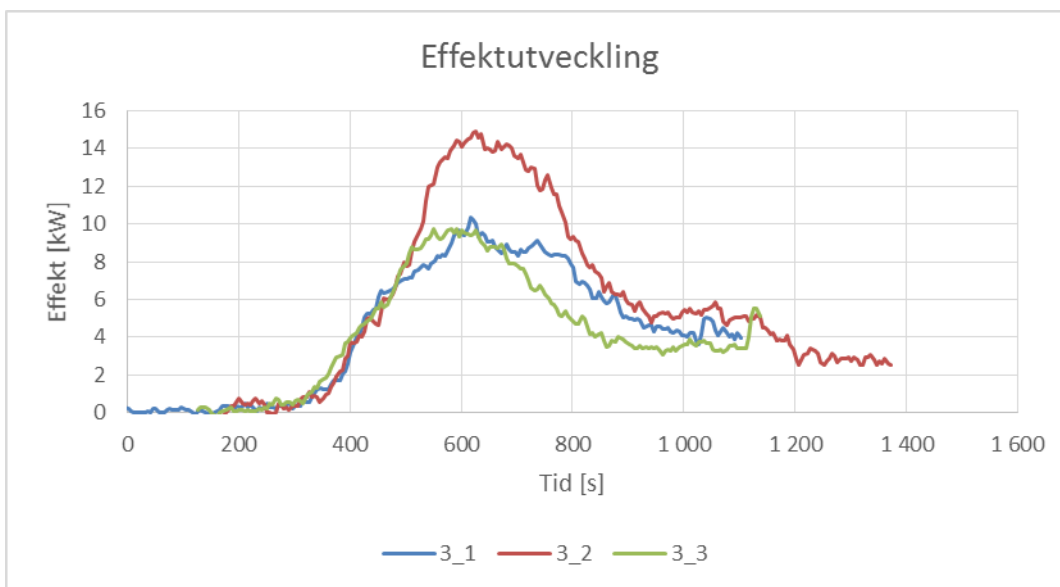
Figur C.5: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 2. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



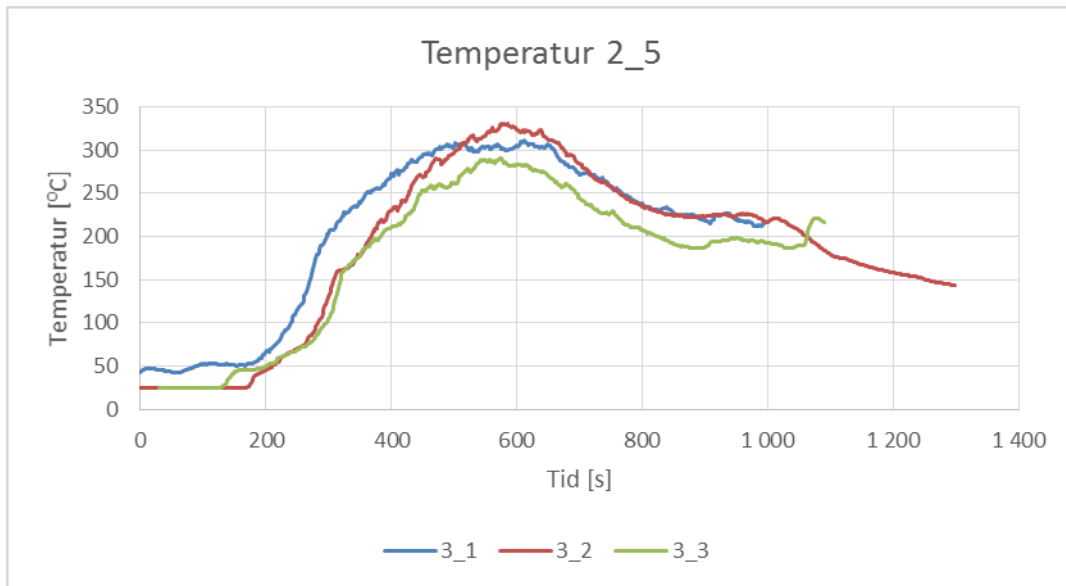
Figur C.6: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 2. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

### C.3 Försöksuppställning 3 – långsam brand, liten öppning, oisolerad

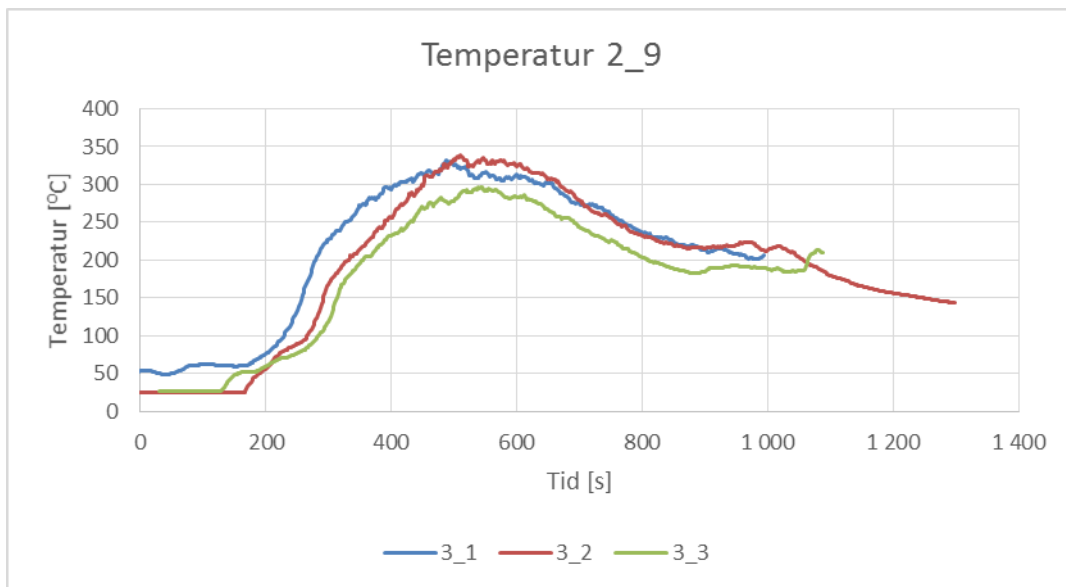
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 3. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 3\_3. Notera att effektmätningen för försök 3\_2 avviker kraftigt från de andra två försöken. En sådan avvikelse mellan effekttutvecklingar för samma försöksuppställning har inte observerats för någon annan uppställning. Det kan inte säkerställas att detta inte beror på fel i mätutrustningen och därför valdes inte denna kurva som representativ för försöksuppställning 3.



Figur C.7: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 3. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



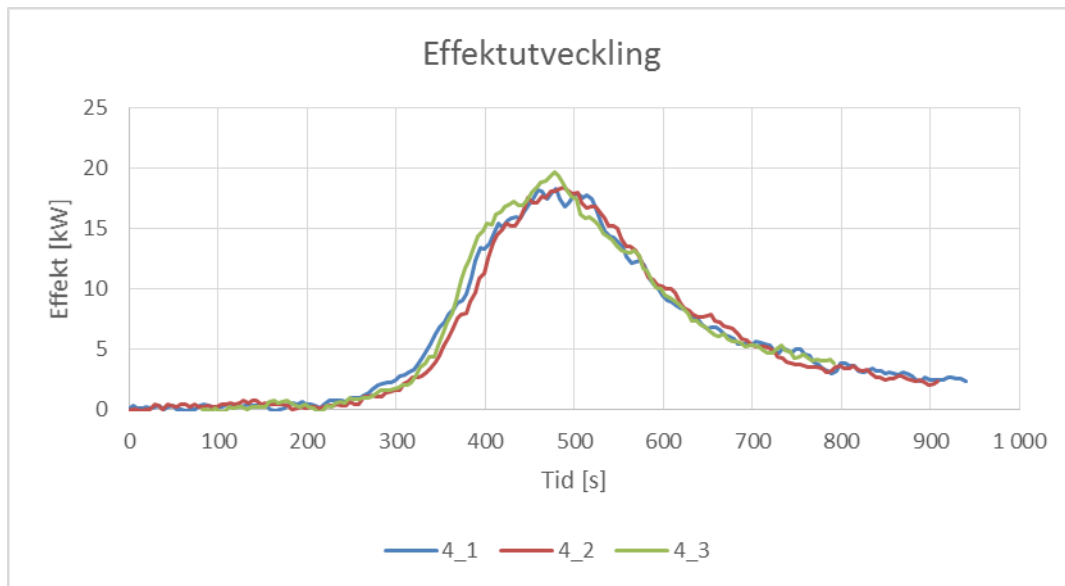
Figur C.8: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 3. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



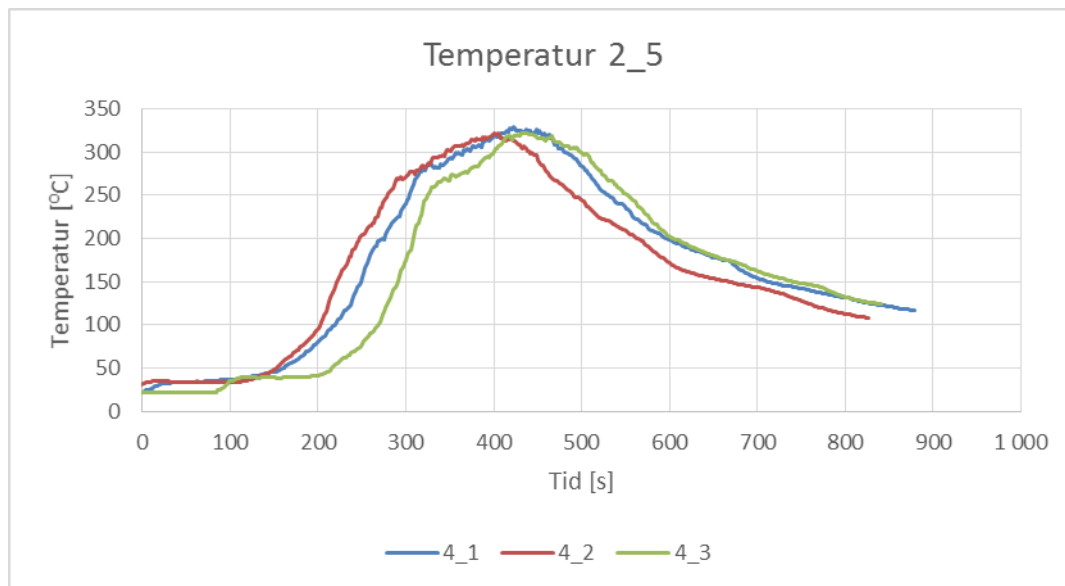
Figur C.9: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 3. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

## C.4 Försöksuppställning 4 – snabb brand, liten öppning, oisolerad

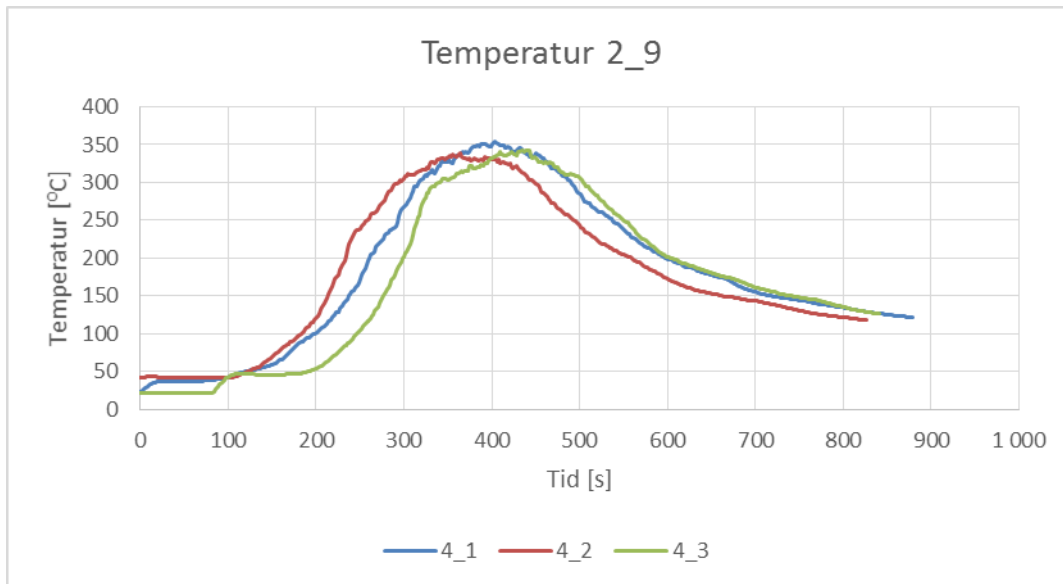
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 4. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 4\_1.



Figur C.10: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 4. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



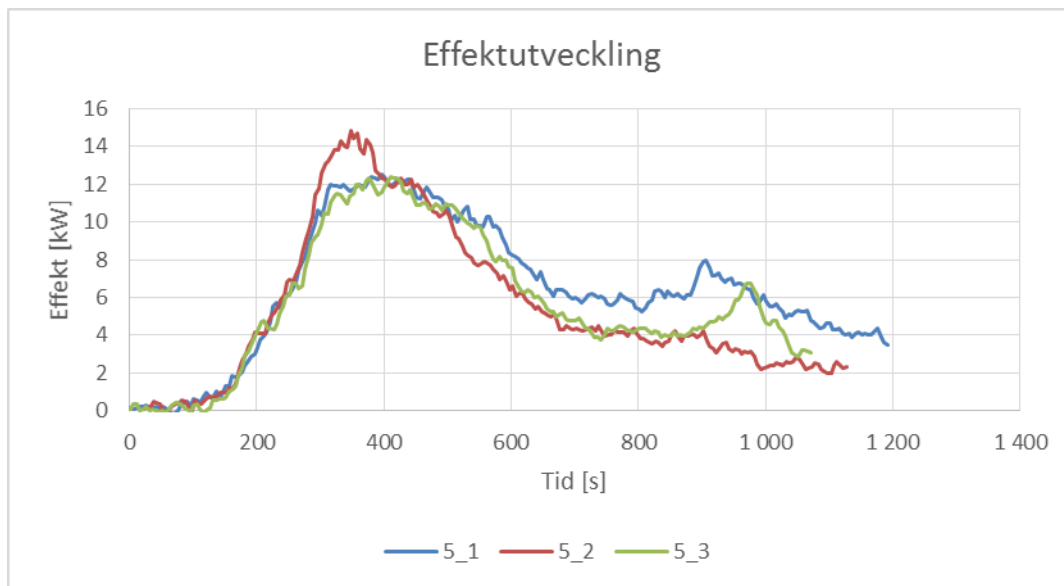
Figur C.11: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 4. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



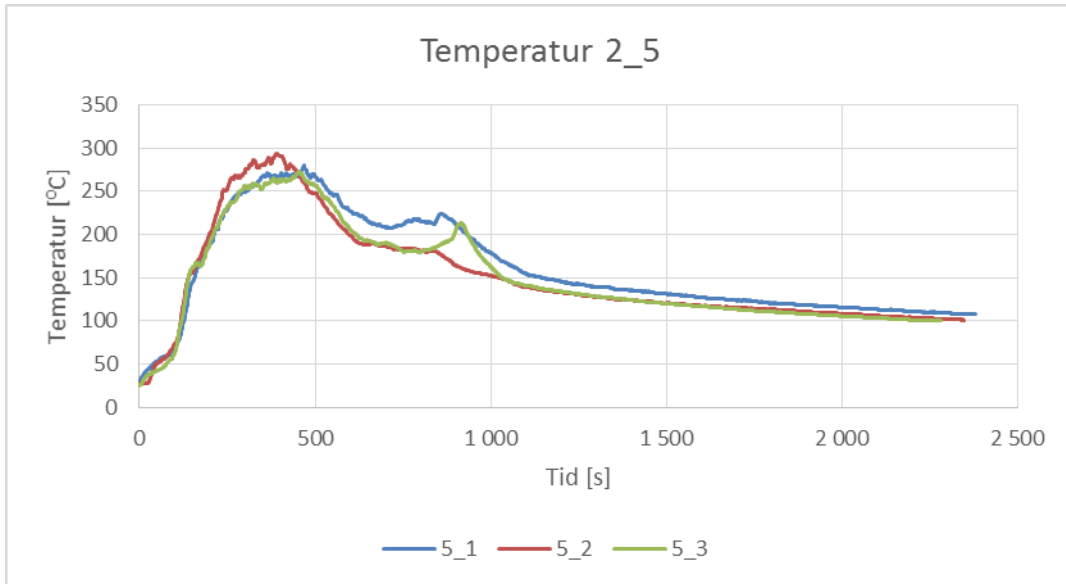
Figur C.12: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 4. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

### C.5 Försöksuppställning 5 – långsam brand, liten öppning, isolerad

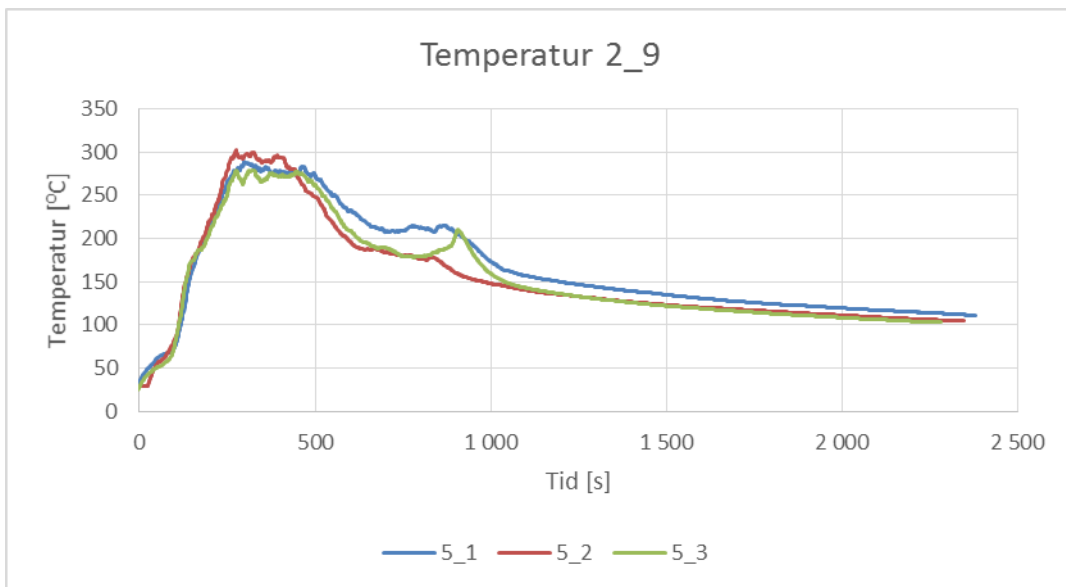
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 5. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 5\_3.



Figur C.13: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 5. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



Figur C.14: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 5. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

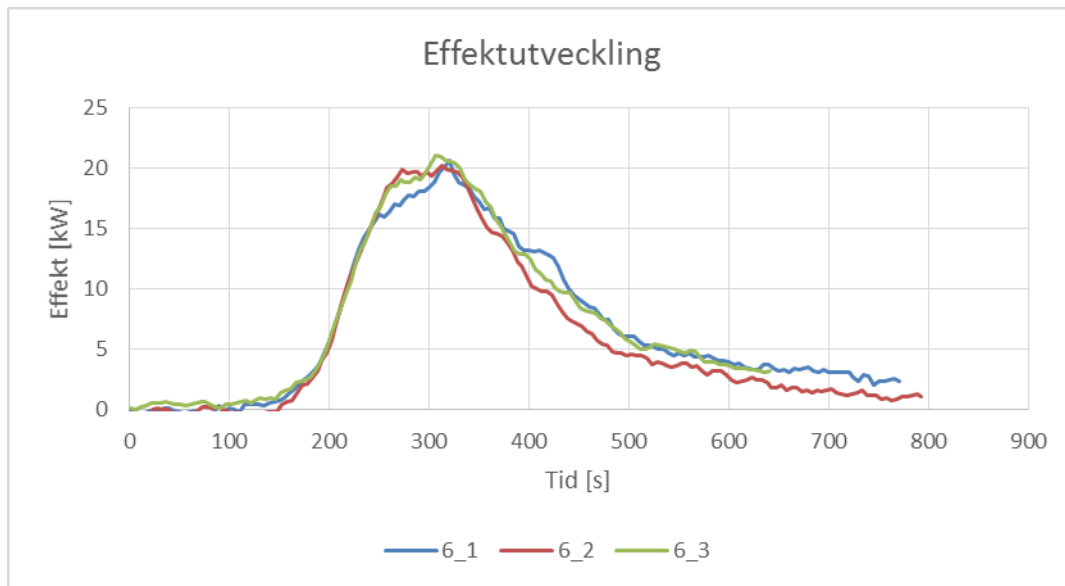


Figur C.15: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 5. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

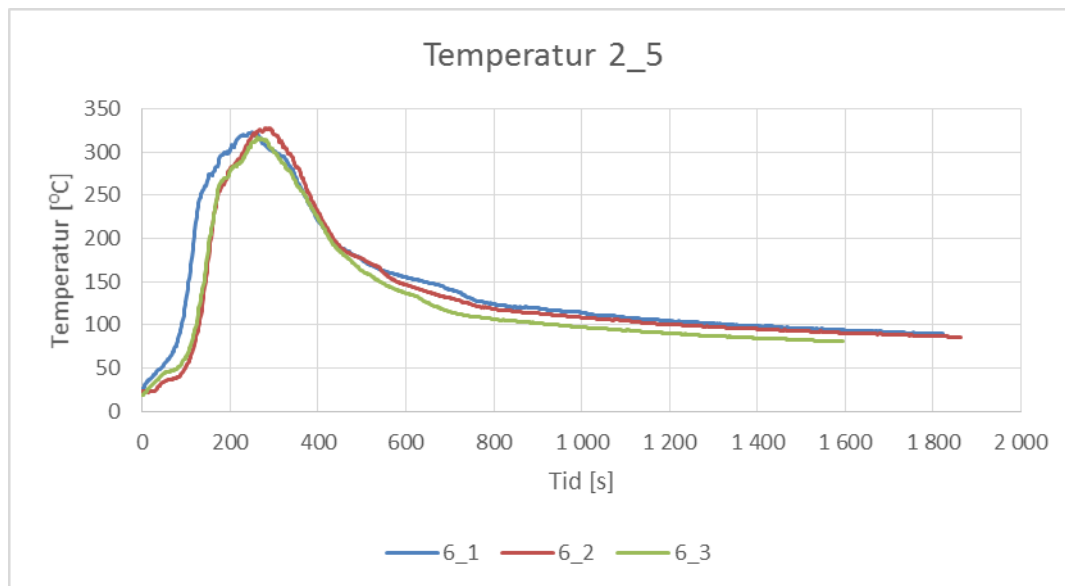


## C.6 Försöksuppställning 6 – snabb brand, liten öppning, isolerad

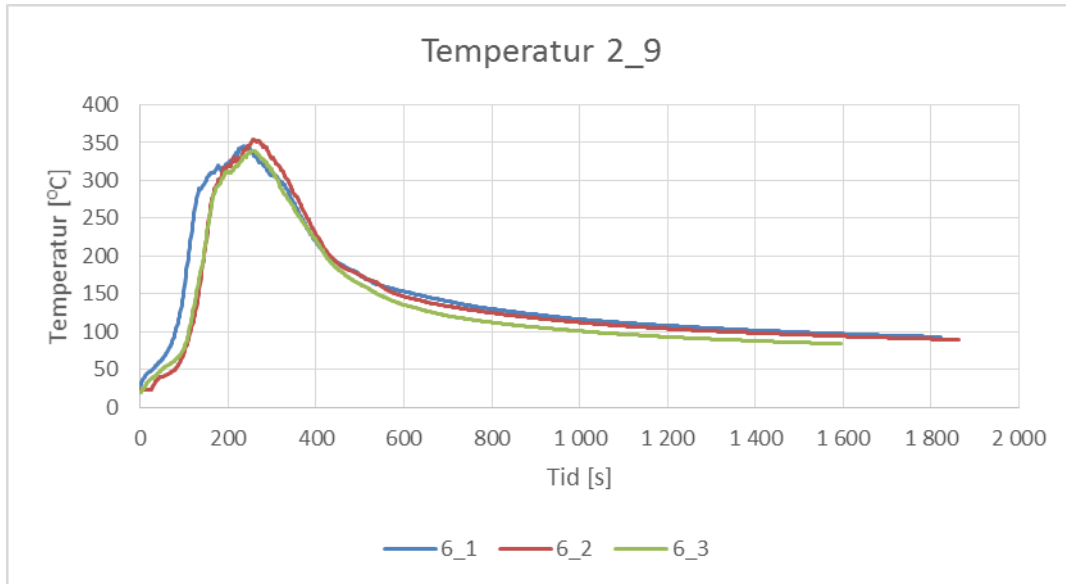
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 6. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 6\_3.



Figur C.16: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 6. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



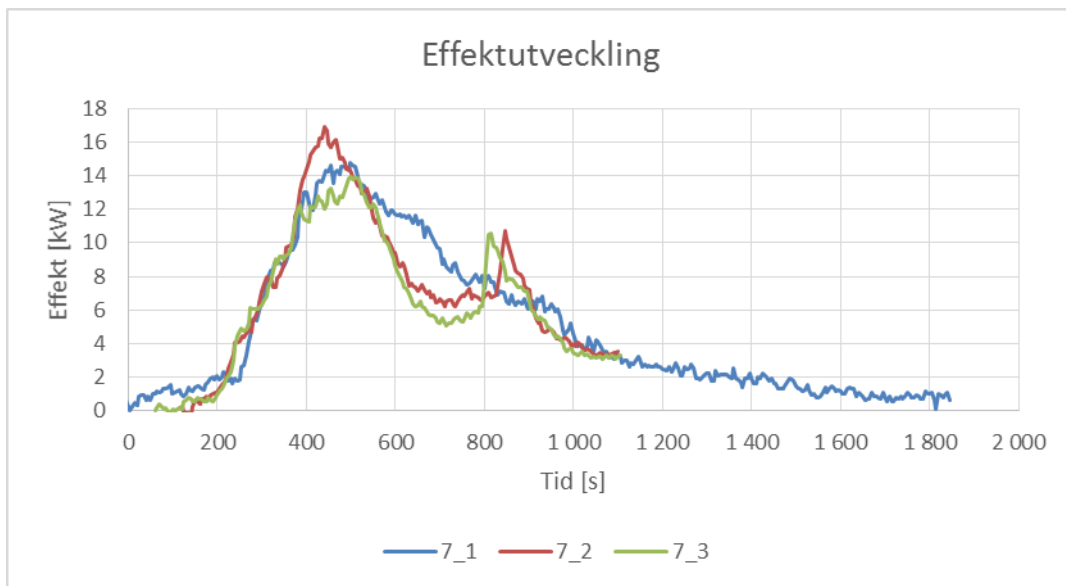
Figur C.17: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 6. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



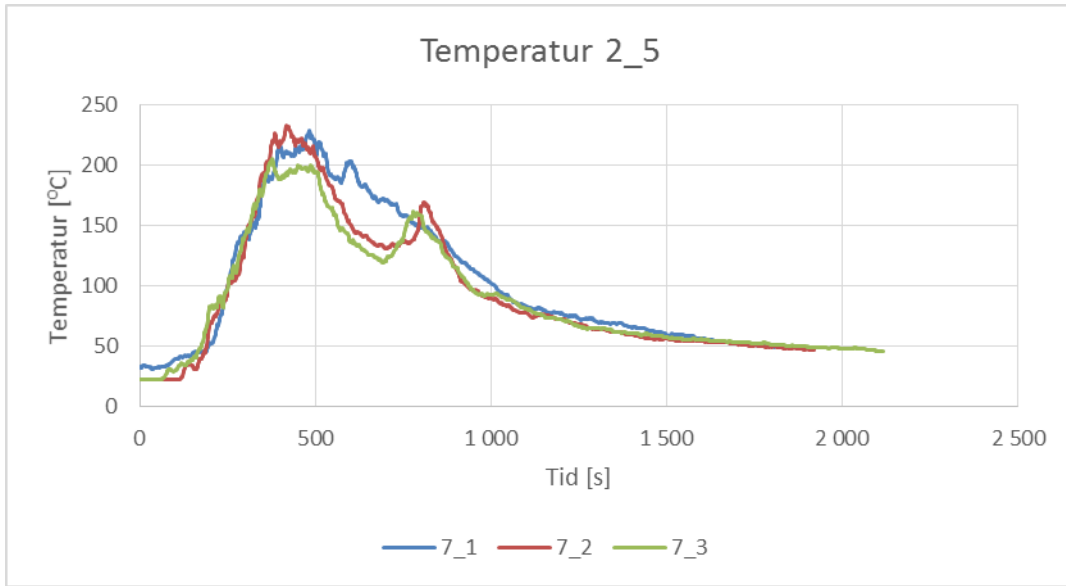
Figur C.18: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 6. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

### C.7 Försöksuppställning 7 – långsam brand, stor öppning, isolerad

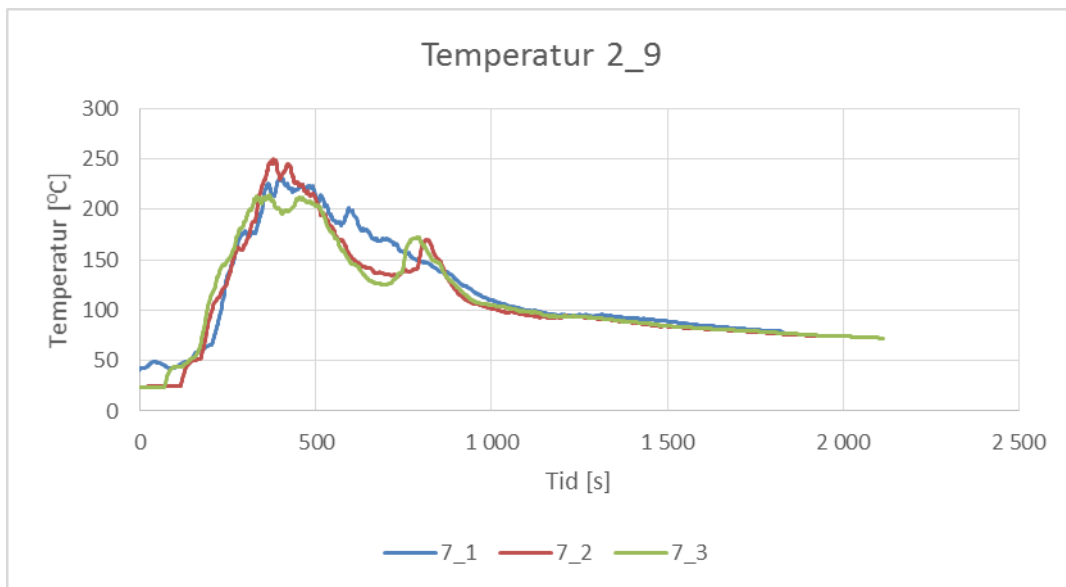
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 7. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 7\_3.



Figur C.19: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 7. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



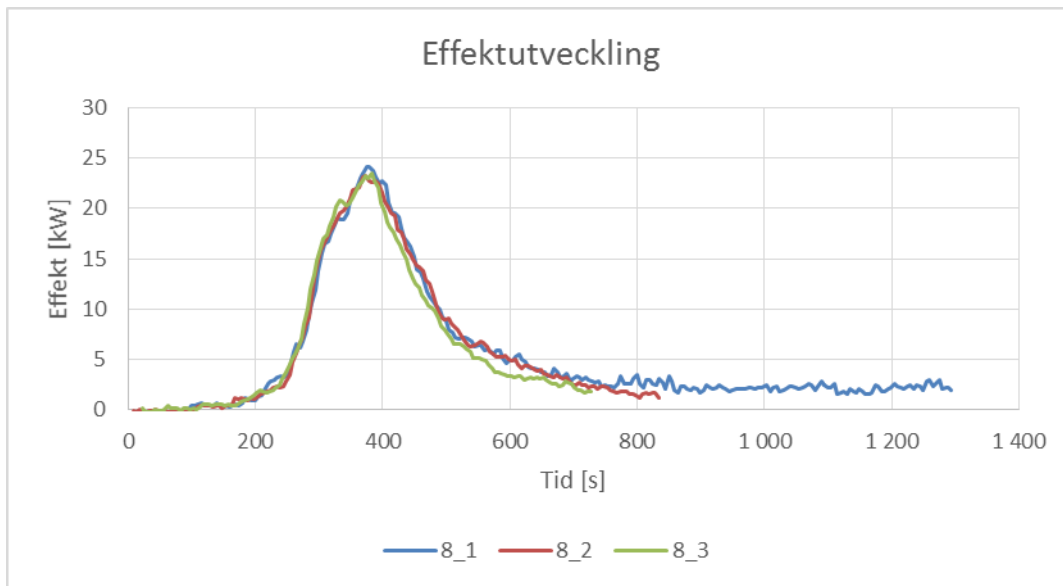
Figur C.20: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 7. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



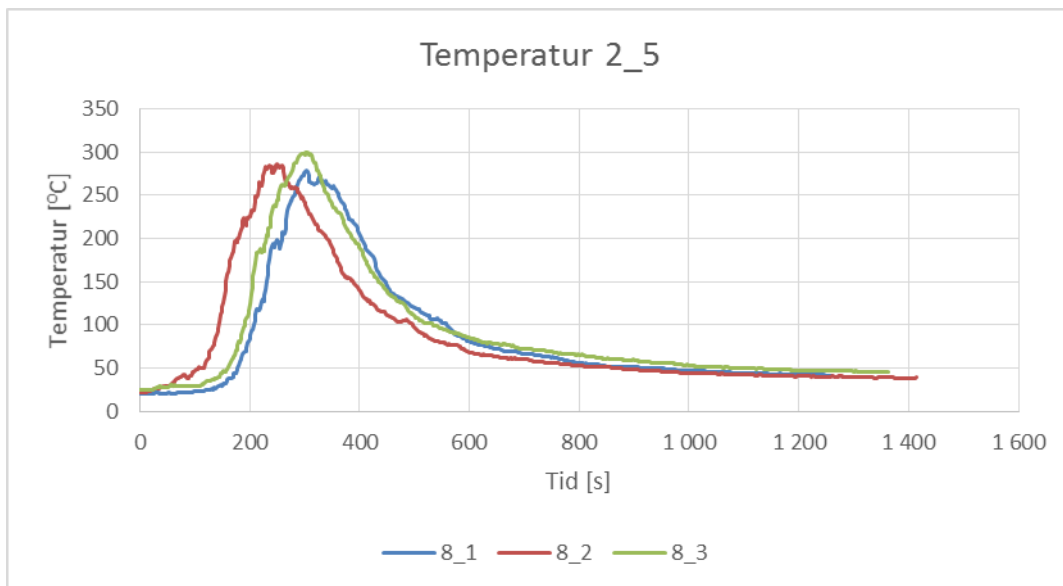
Figur C.21: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 7. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

## C.8 Försöksuppställning 8 – snabb brand, stor öppning, isolerad

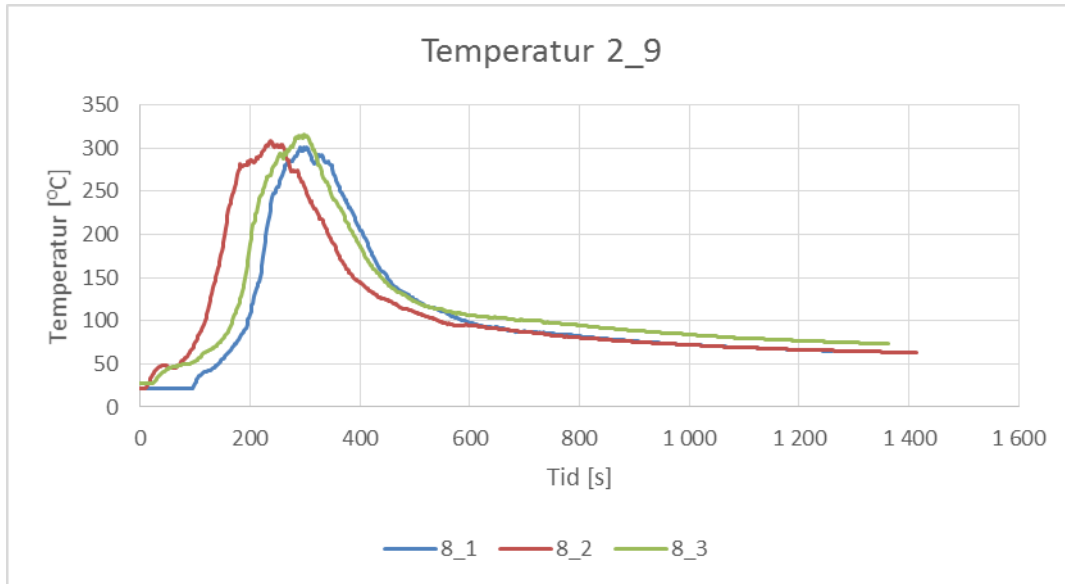
Nedan presenteras uppmätta effektkurvor och temperaturer från de tre försök som genomfördes med uppställning 8. För att välja ut en lämplig effektkurva till att representera försöksuppställningen jämfördes kurvorna och även anteckningar från experimentens utförande beaktades. I det här fallet valdes effektkurvan från försök 8\_1.



Figur C.22: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 8. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



Figur C.23: Temperaturen i termoelement 2\_5 för de tre olika försöken utförda på uppställning 8. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.



Figur C.24: Temperaturen i termoelement 2\_9 för de tre olika försöken utförda på uppställning 8. Kurvorna är förskjutna lika mycket som effektkurvorna.

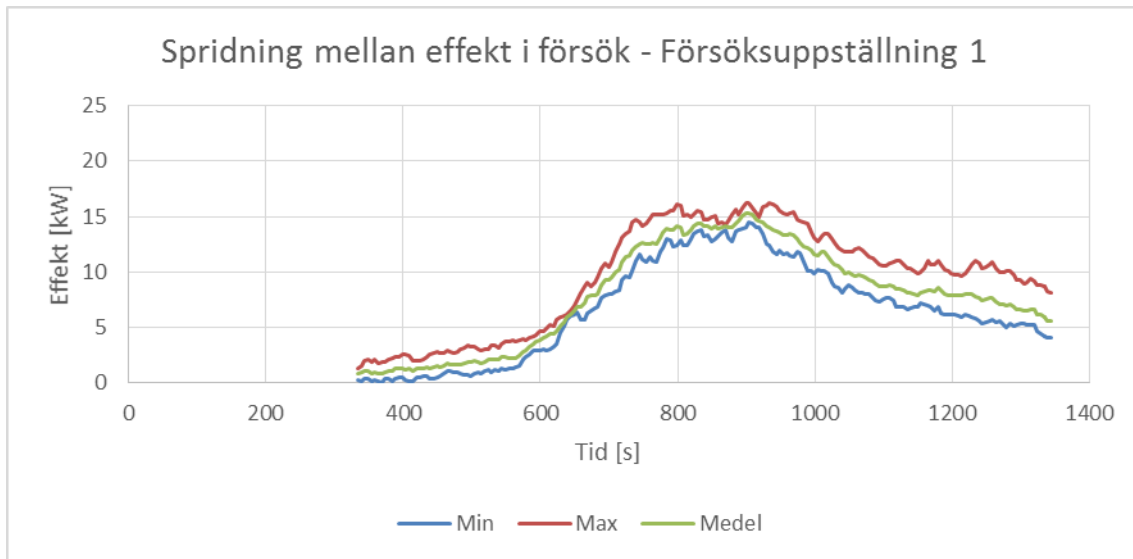
## C.9 Variationer mellan försök

I detta avsnitt undersöks variationer mellan försök på samma försöksuppställningar. Analysen behandlar försöksuppställning 1 och 8 då dessa anses representera spridningen mellan försöken på försöksuppställningar med långsamma respektive snabba bränslebål. Kurvorna är förskjutna i tidsled på samma sätt som tidigare i denna bilaga. Endast den del då resultat finns från alla tre aktuella försök redovisas i analysen.

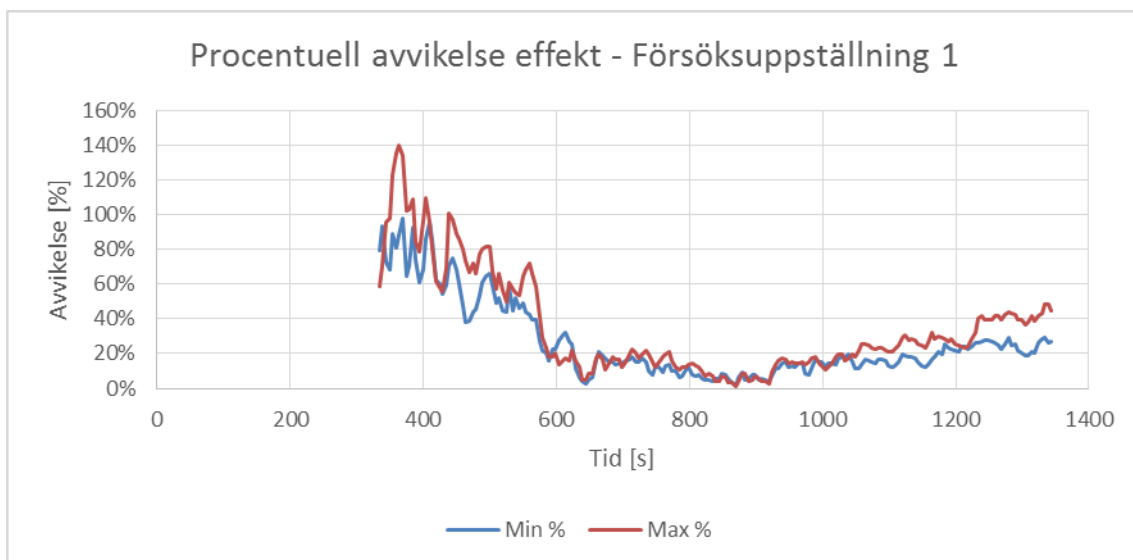
Syftet med analysen är att ge en mer kvantitativ bild av variationerna mellan försöken på två försöksuppställningar. Framförallt framgår det att avvikelserna är större i början av förloppet men blir mindre när effekten ökar. Jämförelsen av de uppmätta temperaturerna sker för endast ett termoelement men anses ge en tillräckligt bra bild för att illustrera variationerna i förloppens olika delar.

### C.9.1 Långsam brand (Försöksuppställning 1)

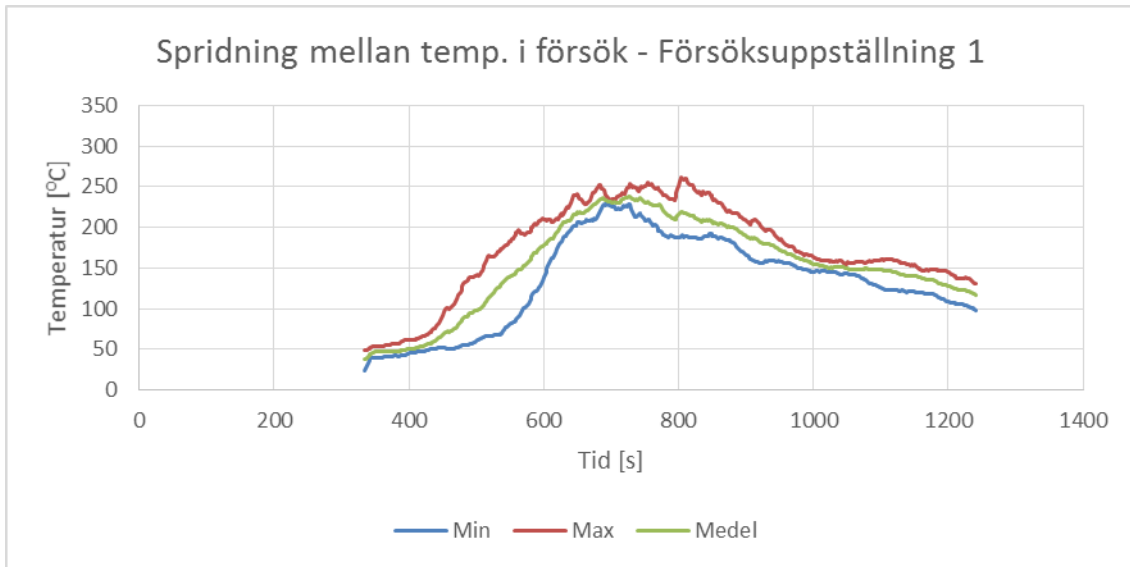
Nedan redovisas variationen i de uppmätta värdena på effektutveckling och temperatur mellan de tre försöken på försöksuppställning 1. Temperaturmätningarna som analyseras kommer från termoelement 2\_9, det vill säga det högst placerade termoelementet i träd 2.



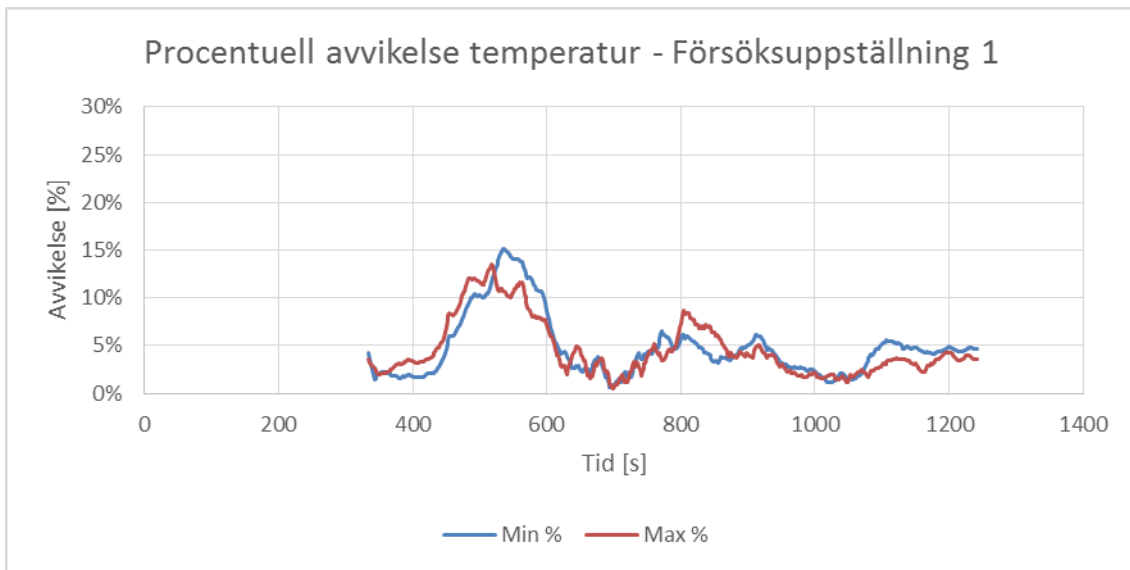
Figur C.25: Kurvorna visar spridningen mellan den uppmätta effekten för försöken på försöksuppställning 1. Kurvorna är förskjutna i tidsled på samma sätt som i Avsnitt C.1.



Figur C.26: Kurvorna redovisar den procentuella skillnaden mellan medelvärde och min- respektive maxvärdet som presenterats i Figur C.25.



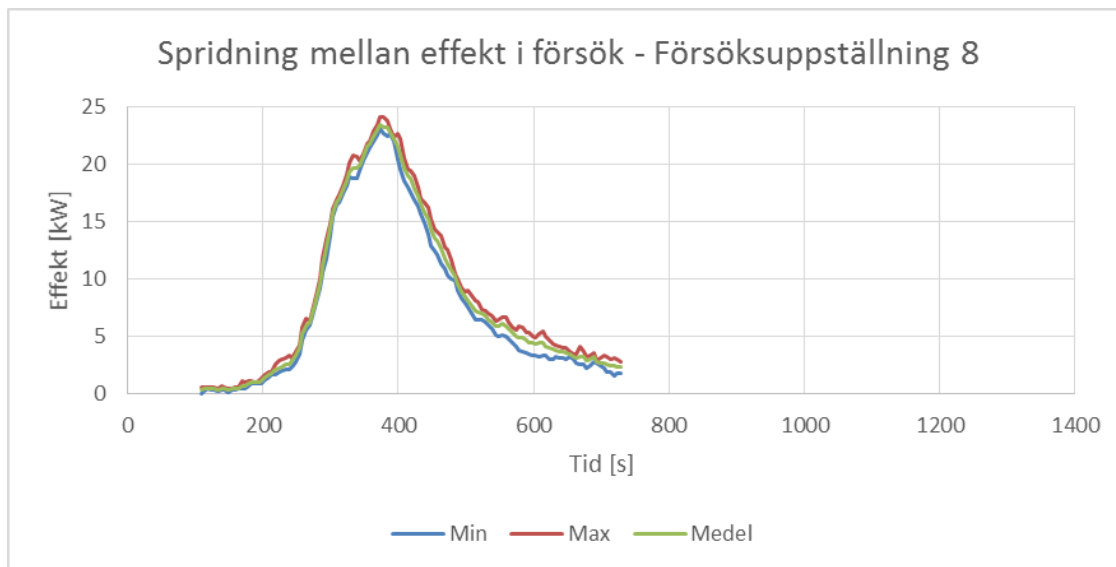
Figur C.27: Kurvorna visar spridningen mellan den uppmätta temperaturen i termoelement 2\_9 för försöken på försöksuppställning 1. Kurvorna är förskjutna i tidsled på samma sätt som i Avsnitt C.1.



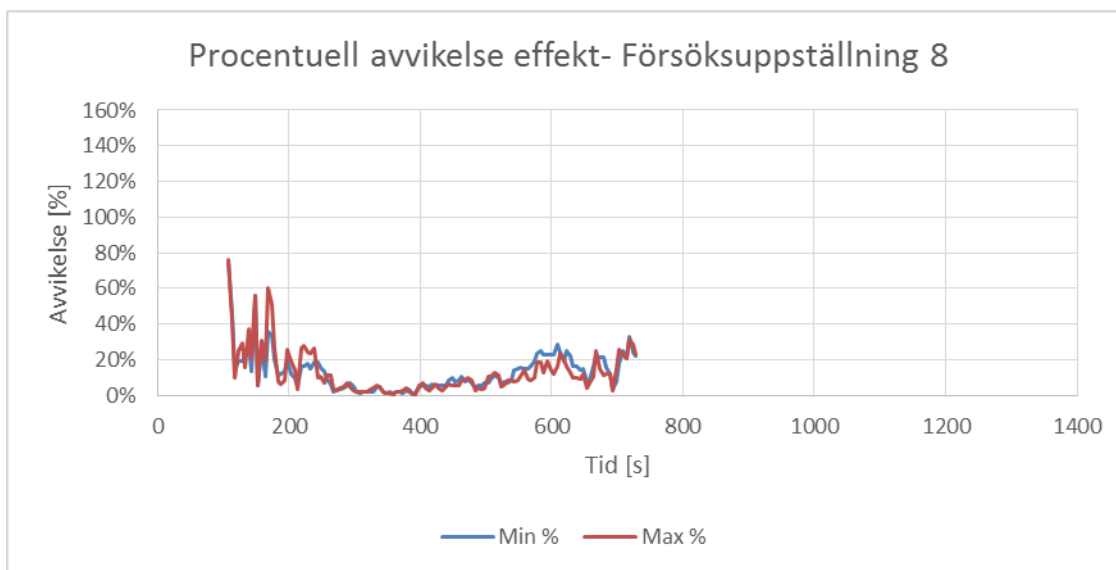
Figur C.28: Kurvorna redovisar den procentuella skillnaden mellan medelvärdet och min- respektive maxvärdet som presenterats i Figur C.27. Avvikelsen är beräknad för absolut temperatur.

### C.9.2 Snabb brand (Försöksuppställning 8)

Nedan redovisas variationen i de uppmätta värdena på effektutveckling och temperatur mellan de tre försöken på försöksuppställning 8. Temperaturmätningarna som analyseras kommer från termoelement 2\_9, det vill säga det högst placerade termoelementet i träd 2.

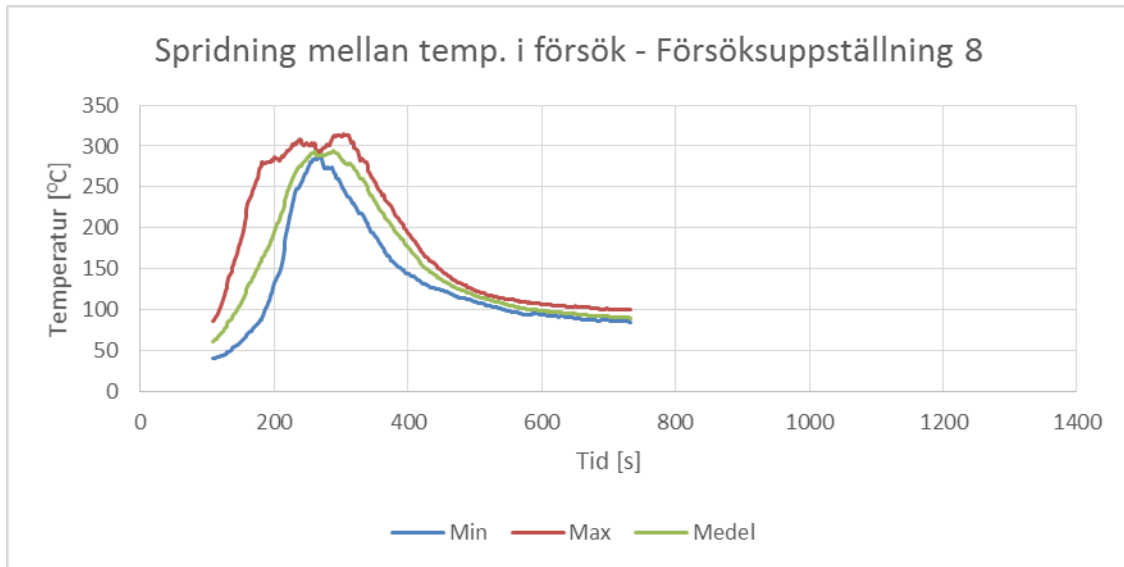


Figur C.29: Kurvorna visar spridningen mellan den uppmätta effekten för försöken på försöksuppställning 8. Kurvorna är förskjutna i tidsled på samma sätt som i Avsnitt C.8.

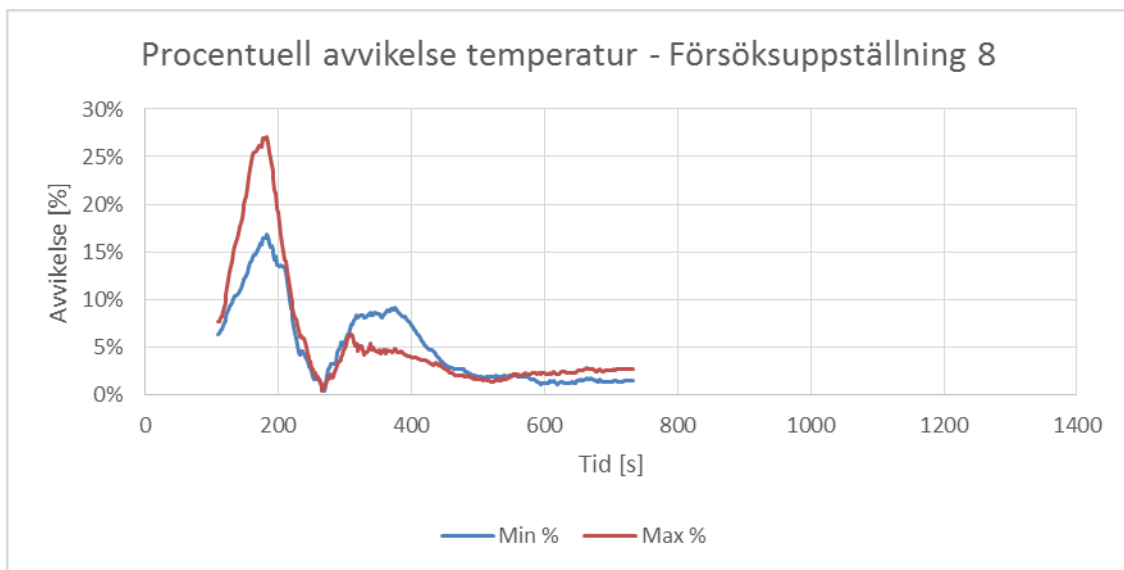


Figur C.30: Kurvorna redovisar den procentuella skillnaden mellan medelvärdet och min- respektive maxvärdet som presenterats i Figur C.29.





Figur C.31: Kurvorna visar spridningen mellan den uppmätta temperaturen i termoelement 2\_9 för försöken på försöksuppställning 8. Kurvorna är förskjutna i tidsled på samma sätt som i Avsnitt C.8.



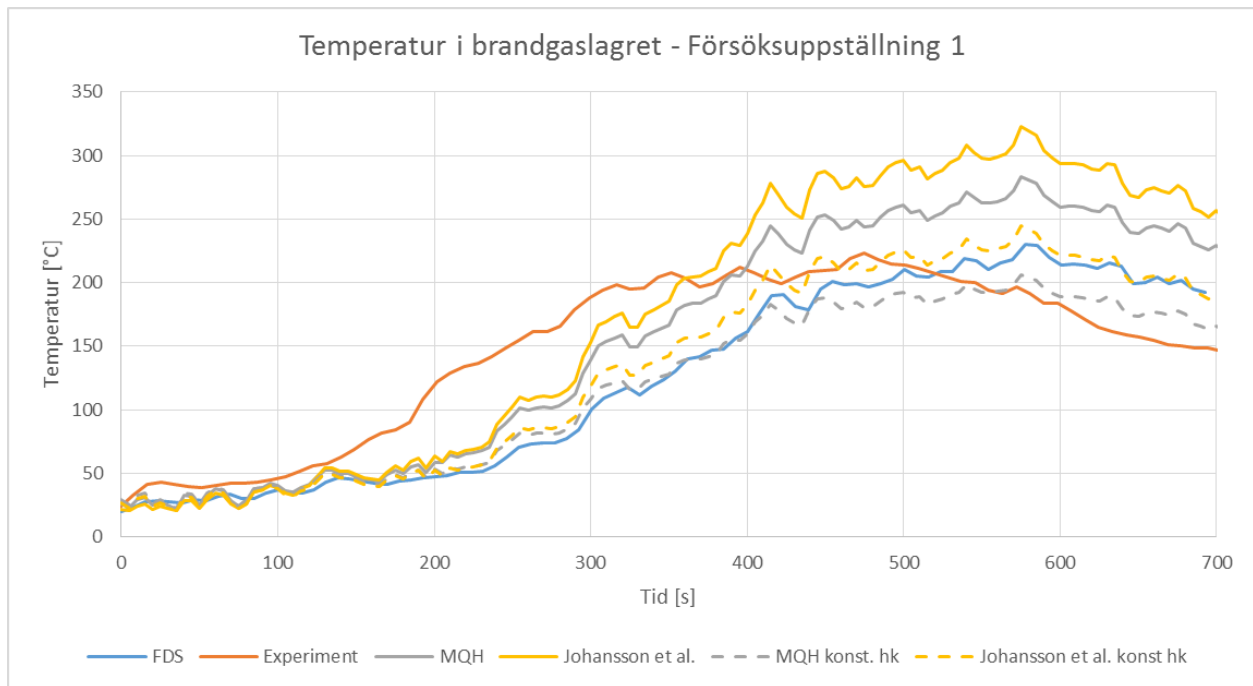
Figur C.32: Kurvorna redovisar den procentuella skillnaden mellan medelvärdet och min- respektive maxvärdet som presenterats i Figur C.31. Avvikelsen är beräknad för absolut temperatur.



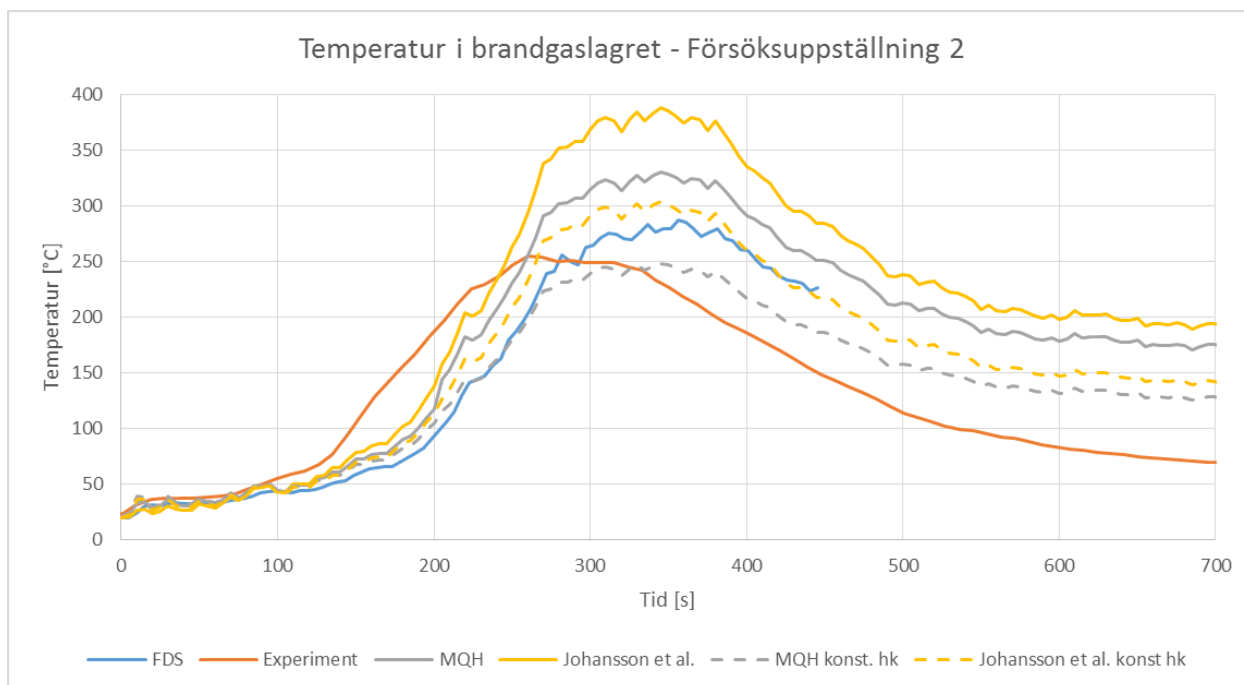
## Bilaga D Olika metoder för att uppskatta värmeövergångstalet

I denna bilaga presenteras resultaten från de olika sätten att uppskatta värmeövergångstalet då temperaturen i brandgaslagret beräknas med metoderna MQH och Johansson et al. De olika metoderna för att uppskatta värmeövergångstalet har presenterats i Avsnitt 3.3.

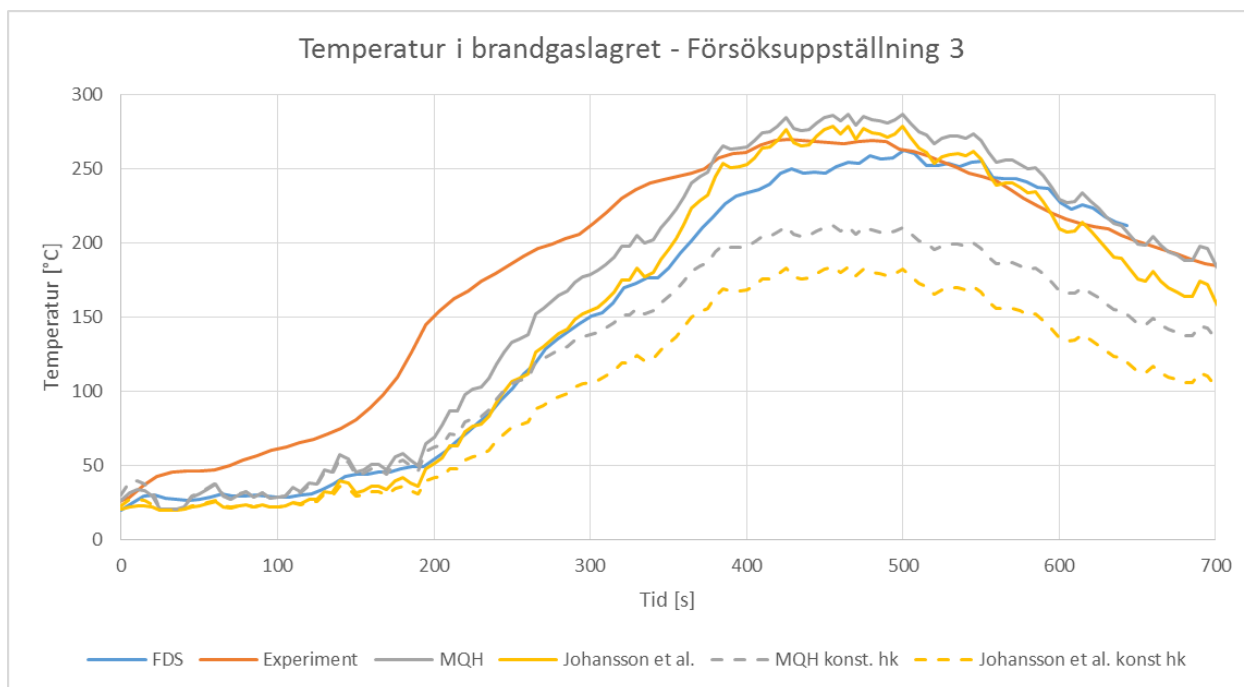
I Figur D.1 till Figur D.8 presenteras temperaturen i brandgaslagret från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder för respektive försöksuppställning.



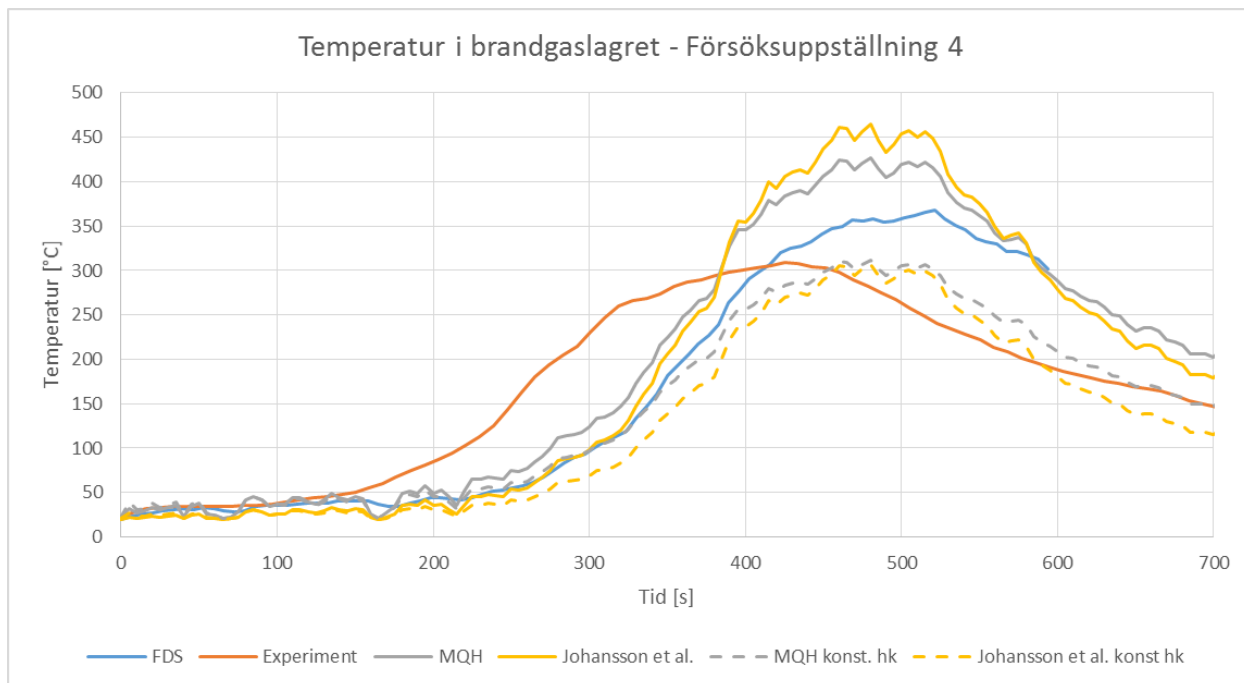
Figur D.1: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med ett konstant ansatt  $h_k$  för hela förloppet.



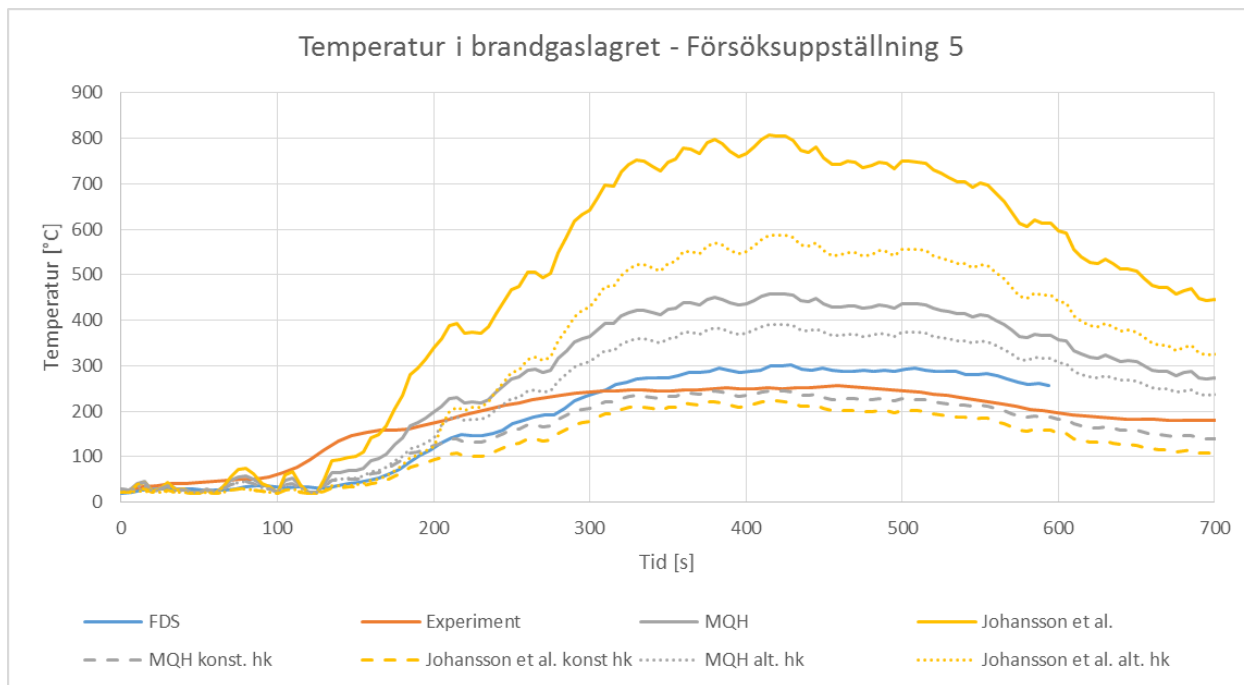
Figur D.2: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med ett konstant ansatt  $h_k$  för hela förloppet.



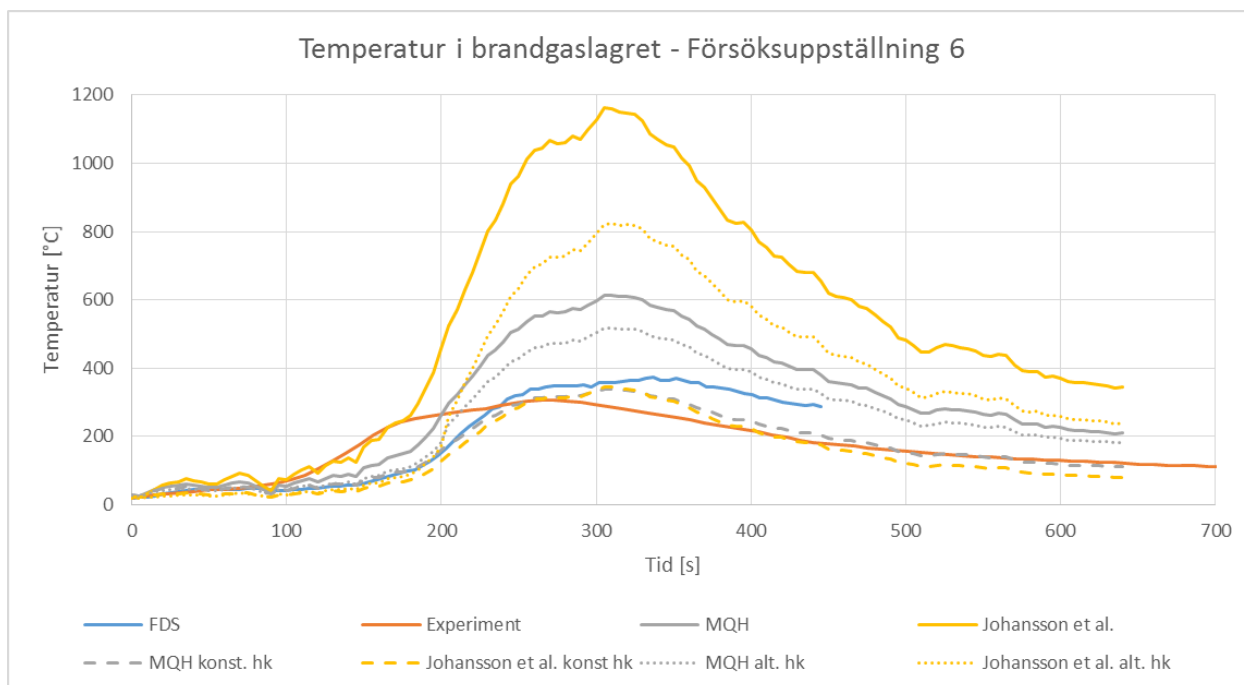
Figur D.3: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med ett konstant ansatt  $h_k$  för hela förloppet.



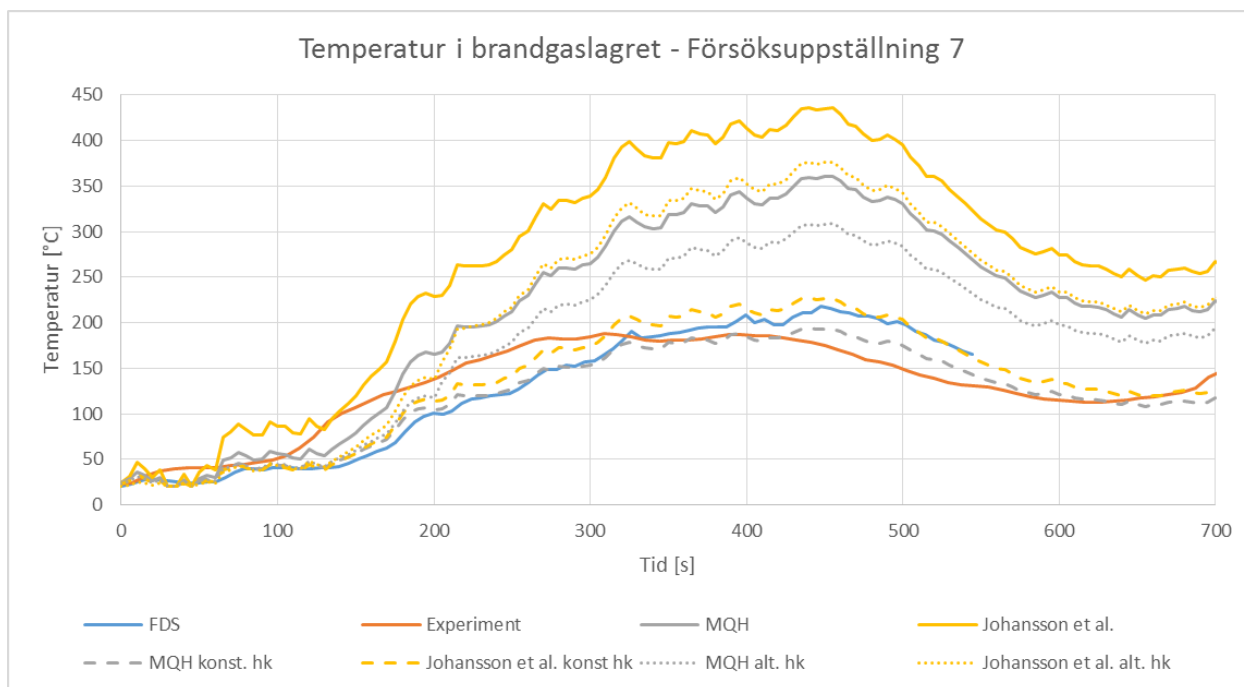
Figur D.4: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med ett konstant ansatt  $h_k$  för hela förloppet.



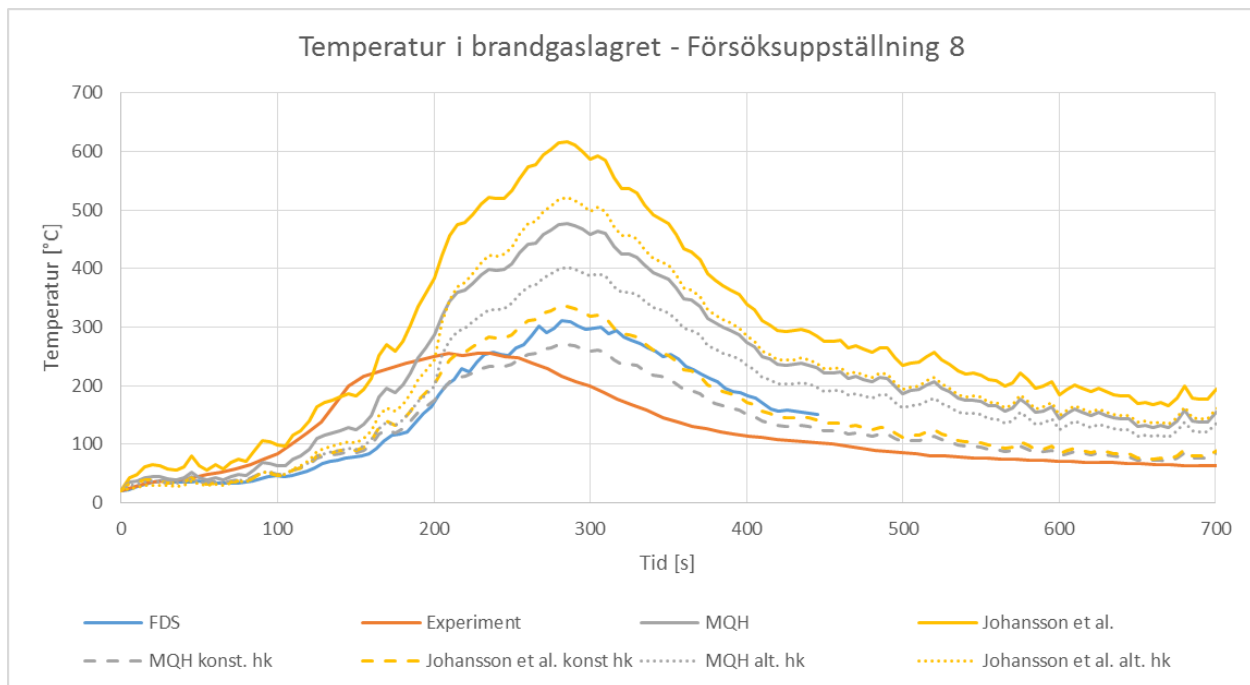
Figur D.5: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med två alternativa sätt att ansätta  $h_k$ .



Figur D.6: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med två alternativa sätt att ansätta  $h_k$ .



Figur D.7: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med två alternativa sätt att ansätta  $h_k$ .



Figur D.8: Temperaturen i brandgaslagret som en funktion av tiden. Förutom temperaturen från experiment, simuleringar och handberäkningsmetoder redovisade i huvudrapporten, är temperaturen beräknad med två alternativa sätt att ansätta  $h_k$ .





## Bilaga E Resultatjämförelse isolering, öppning och bränsle

För att underlätta analys av hur de olika undersökta parametrarna påverkar resultatet presenteras här en bilaga där endast en parameter ändras i taget. Effektkurvorna skiljer alltid något mellan experimenten men flera slutsatser har trots det kunnat dras från jämförelserna. Dessa slutsatser beskrivs mer i varje delstycke.

### E.1 Isolering

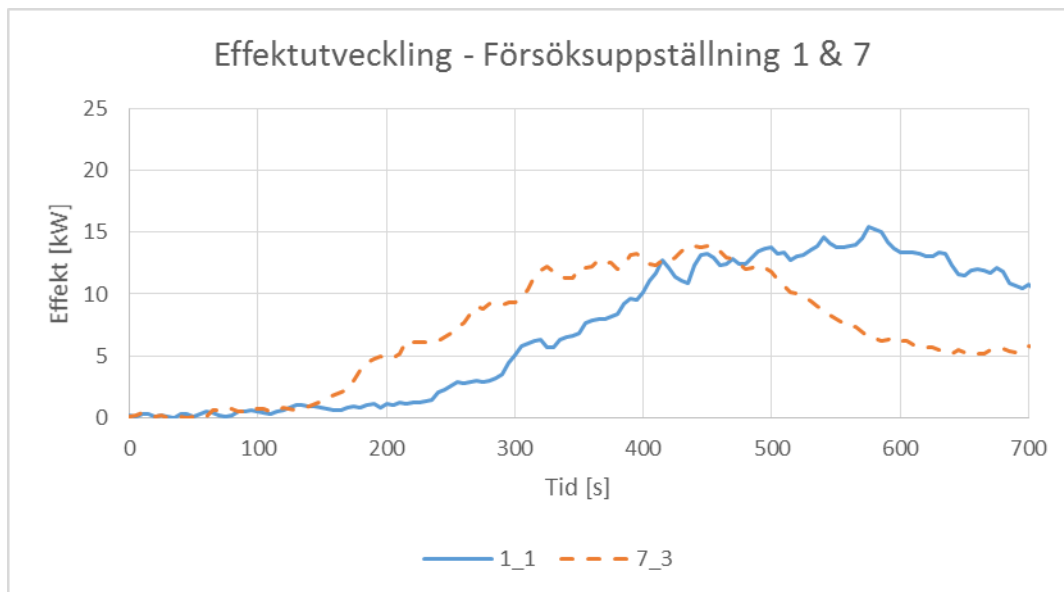
I detta avsnitt undersöks isoleringens påverkan på resultatet. Detta görs genom att jämföra resultat från försöksuppställningar som förutom olika väggmaterial är helt lika. Jämförelserna visar bland annat att handberäkningarna överskattar brandgaslagrets temperatur betydligt mer för uppställningar med isolerade väggar.

#### E.1.1 Långsam brand, stor öppning

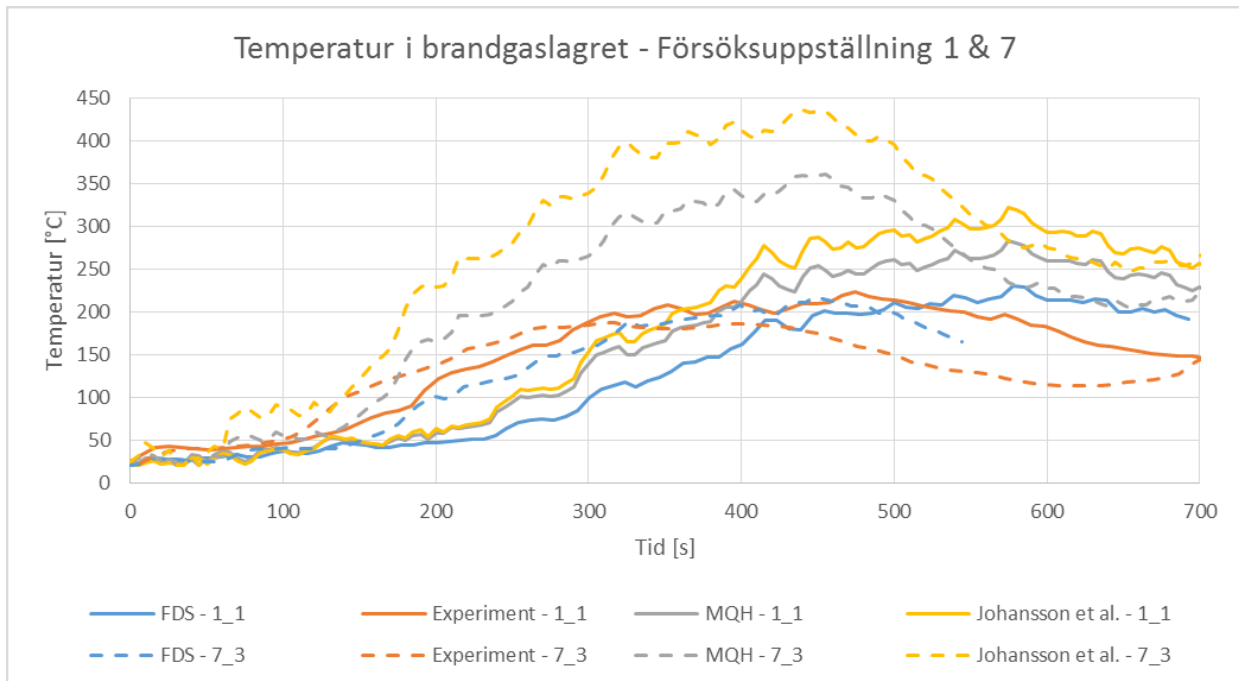
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 1 med resultaten från försöksuppställning 7. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.1.

Tabell E.1: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

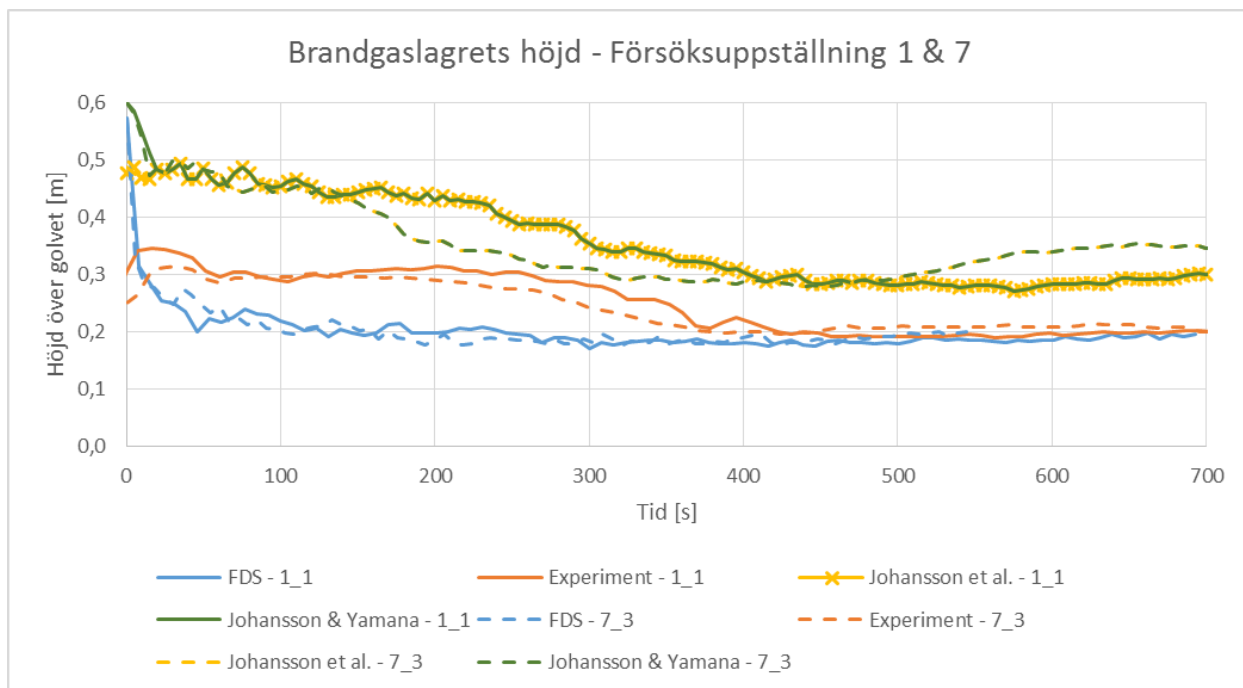
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
1	Nej	Stor	Långsam
7	Ja	Stor	Långsam



Figur E.1: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.2: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



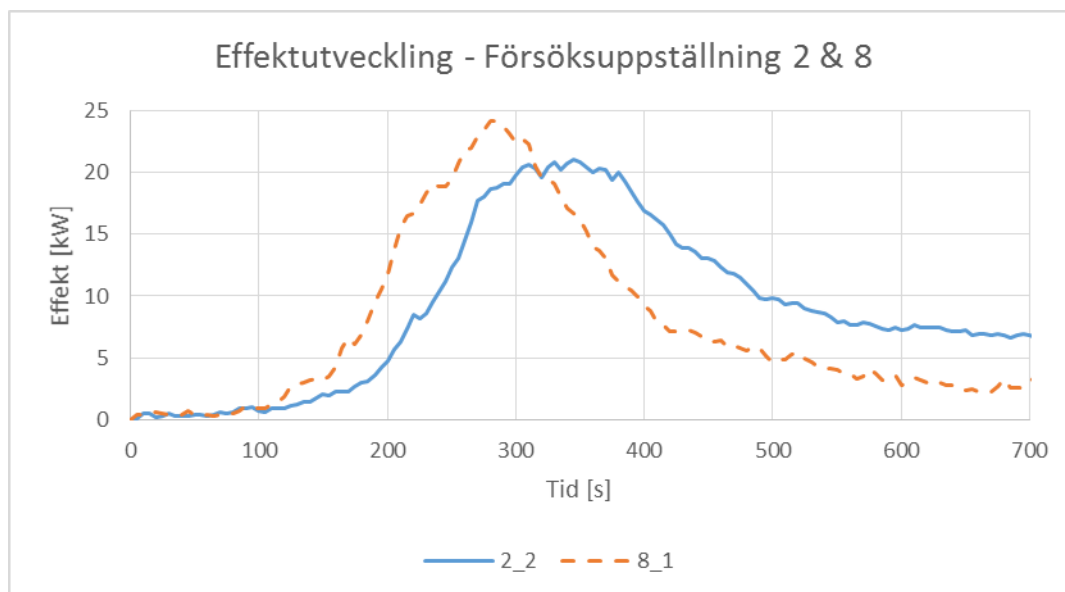
Figur E.3: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

## E.1.2 Snabb brand, stor öppning

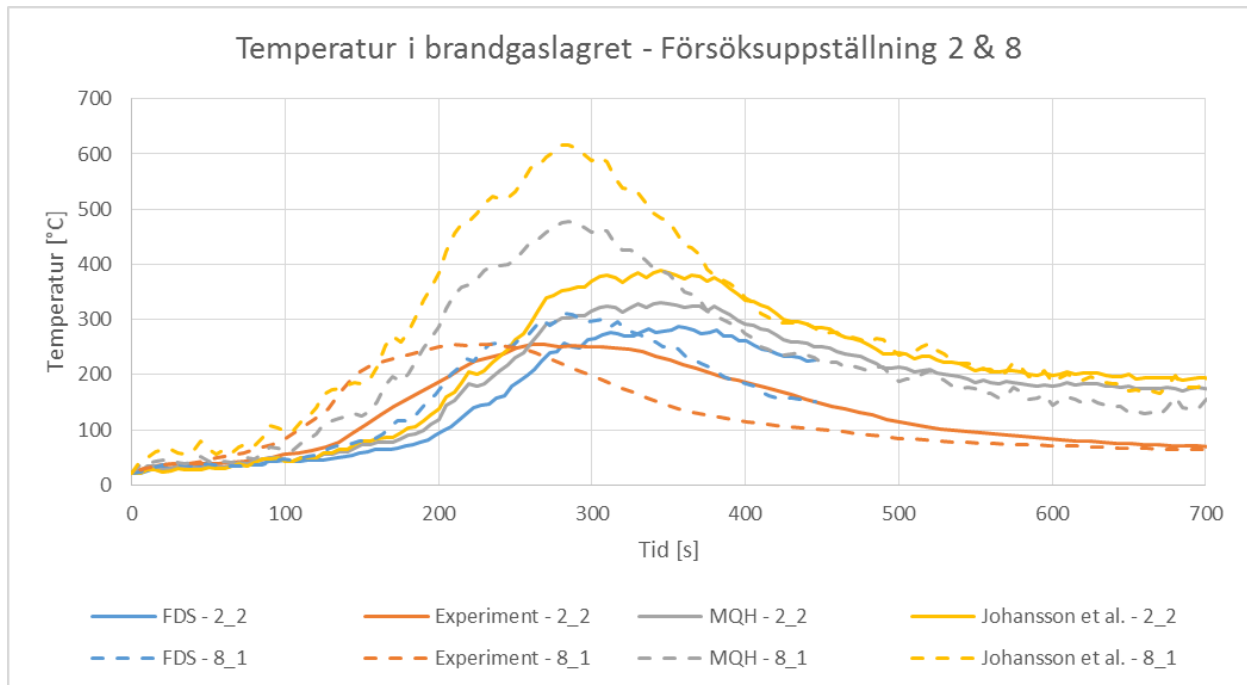
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 2 med resultaten från försöksuppställning 8. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.2

Tabell E.2: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

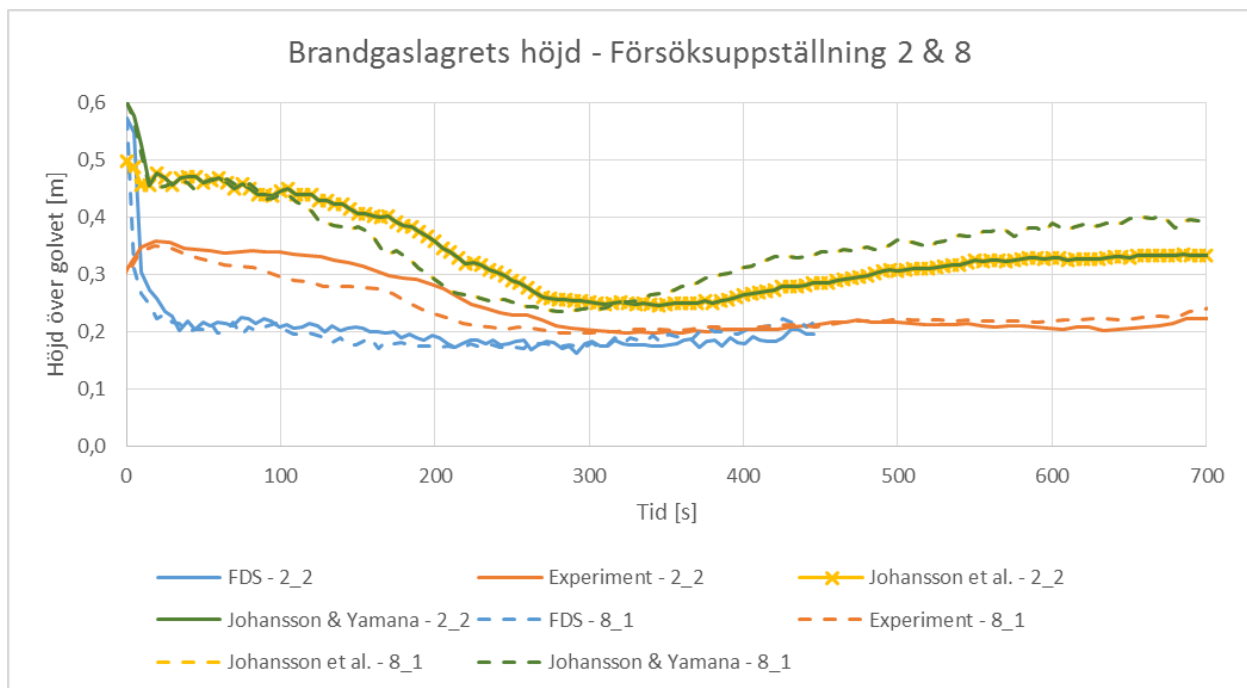
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
2	Nej	Stor	Snabb
8	Ja	Stor	Snabb



Figur E.4: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.5: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



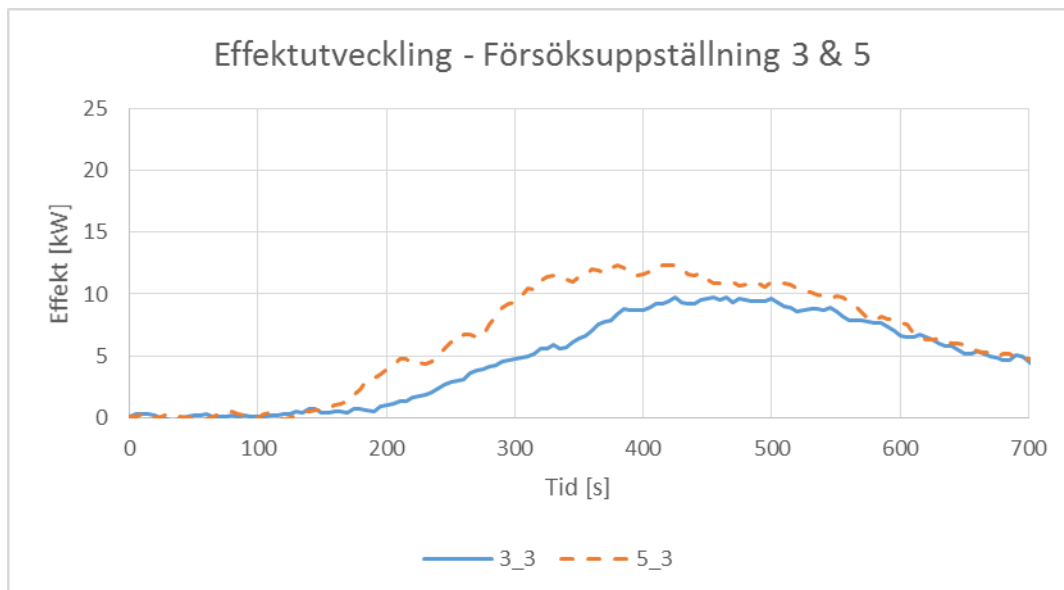
Figur E.6: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.1.3 Långsam brand, liten öppning

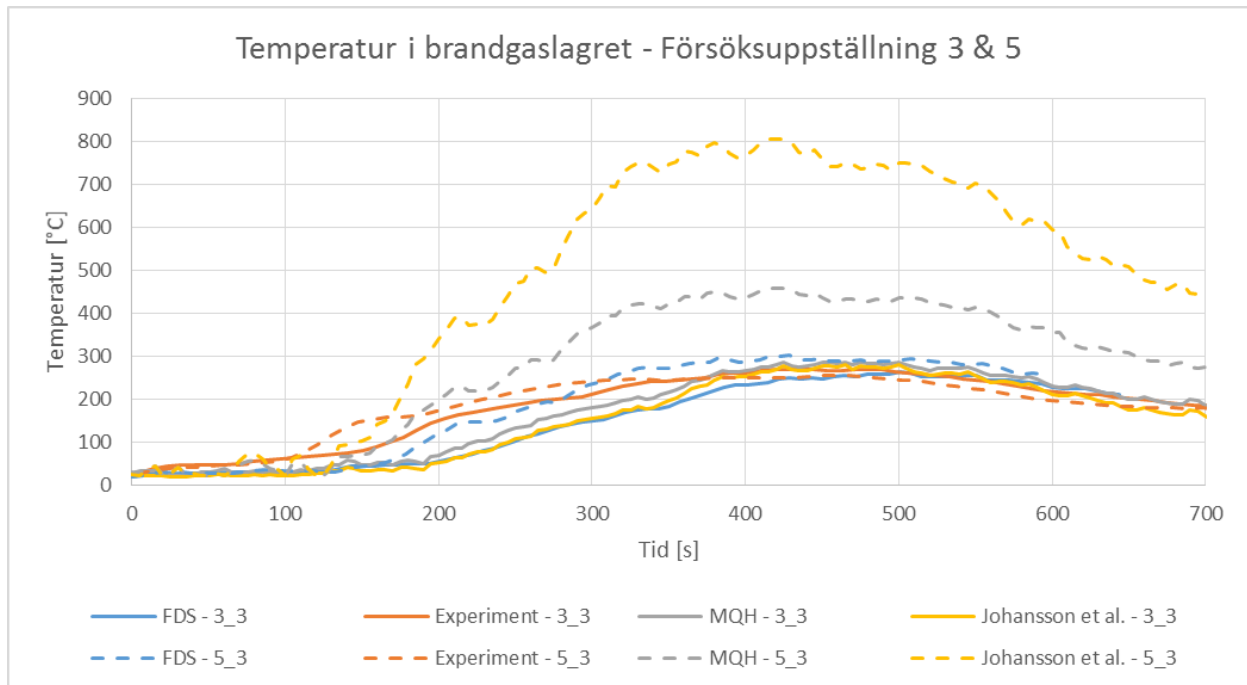
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 3 med resultaten från försöksuppställning 5. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.3.

Tabell E.3: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

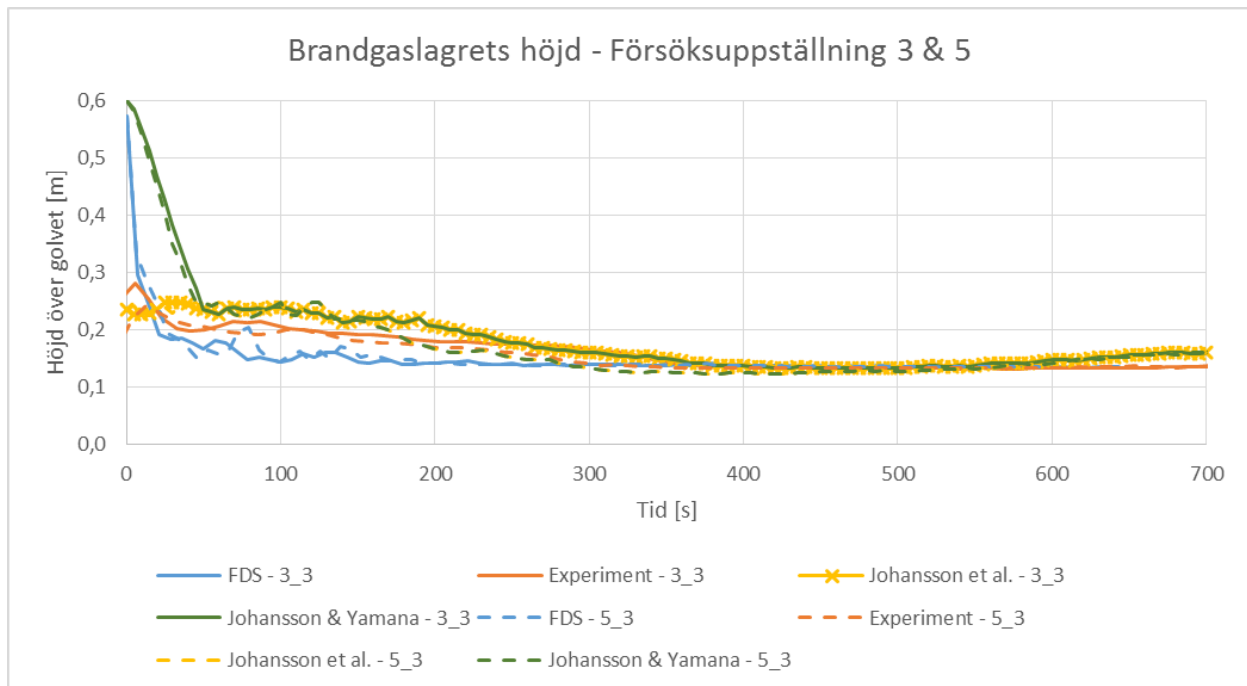
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
3	Nej	Liten	Långsam
5	Ja	Liten	Långsam



Figur E.7: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.8: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



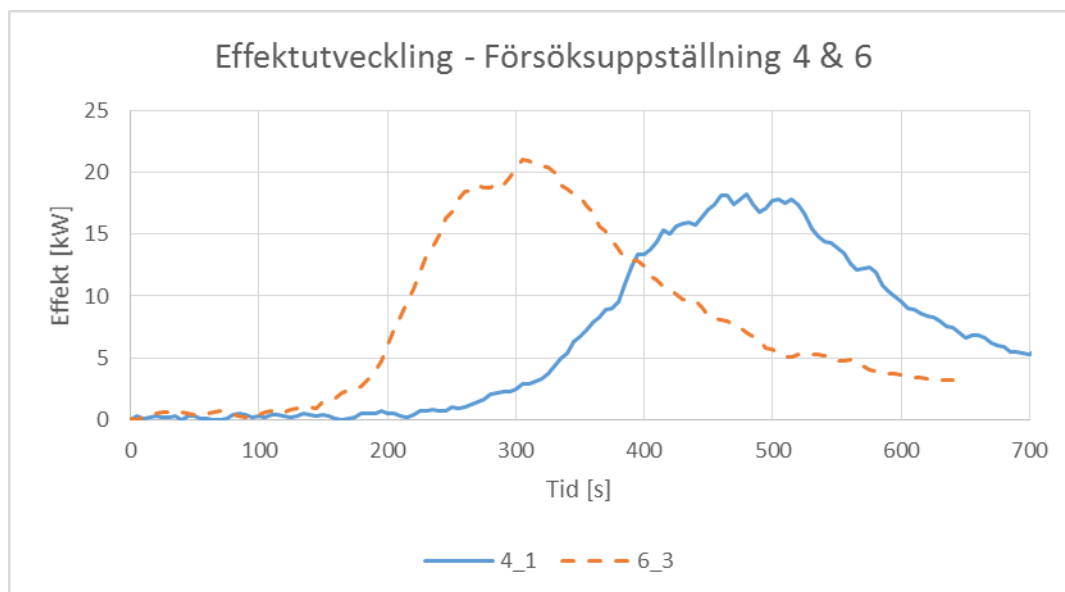
Figur E.9: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.1.4 Snabb brand, liten öppning

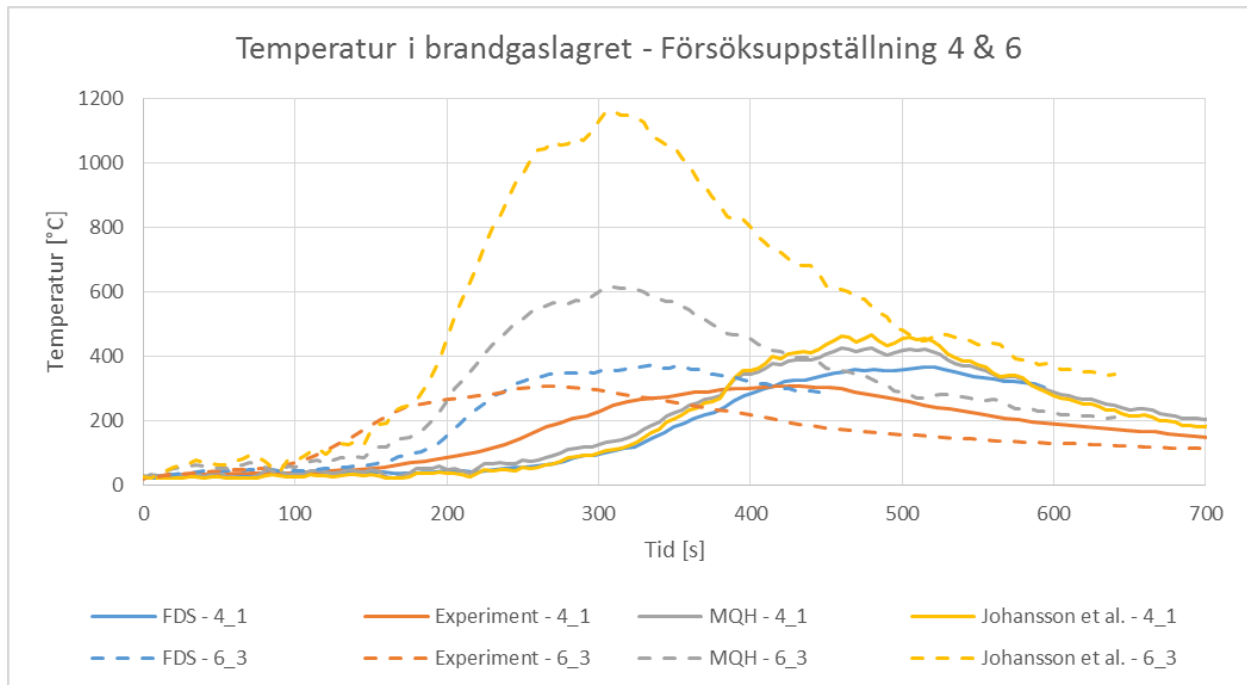
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 4 med resultaten från försöksuppställning 6. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.4.

Tabell E.4: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

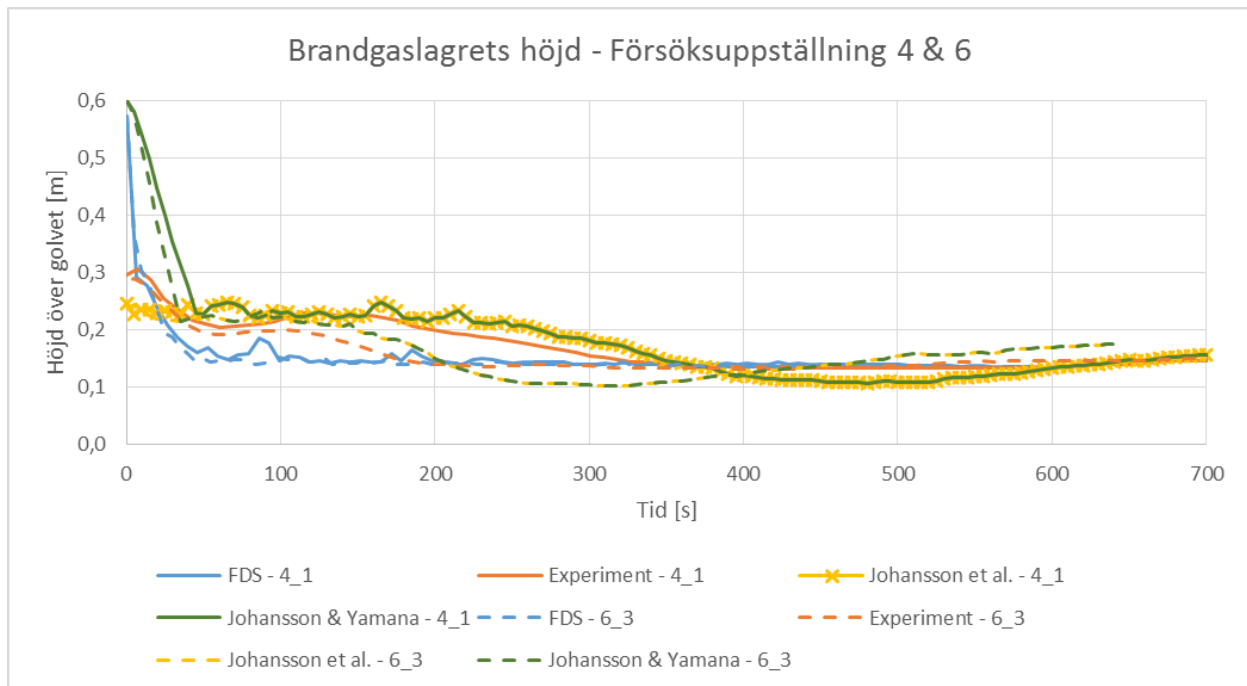
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
4	Nej	Liten	Snabb
6	Ja	Liten	Snabb



Figur E.10: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.11: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



Figur E.12: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



## E.2 Öppningshöjd

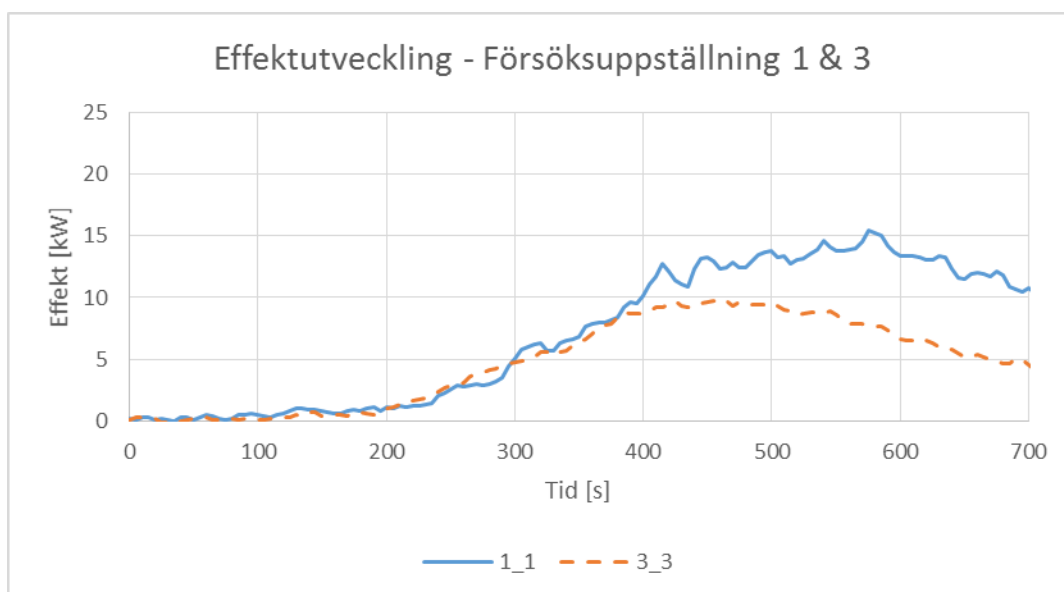
I detta avsnitt undersöks öppningshöjdens påverkan på resultatet. Detta görs genom att jämföra resultat från försöksuppställningar som förutom olika öppningshöjder är helt lika. Jämförelsen visar bland annat att det är större spridning mellan uppskattningarna av brandgaslagrets höjd för försöksuppställningarna med stor öppning.

### E.2.1 Oisolerad, långsam brand

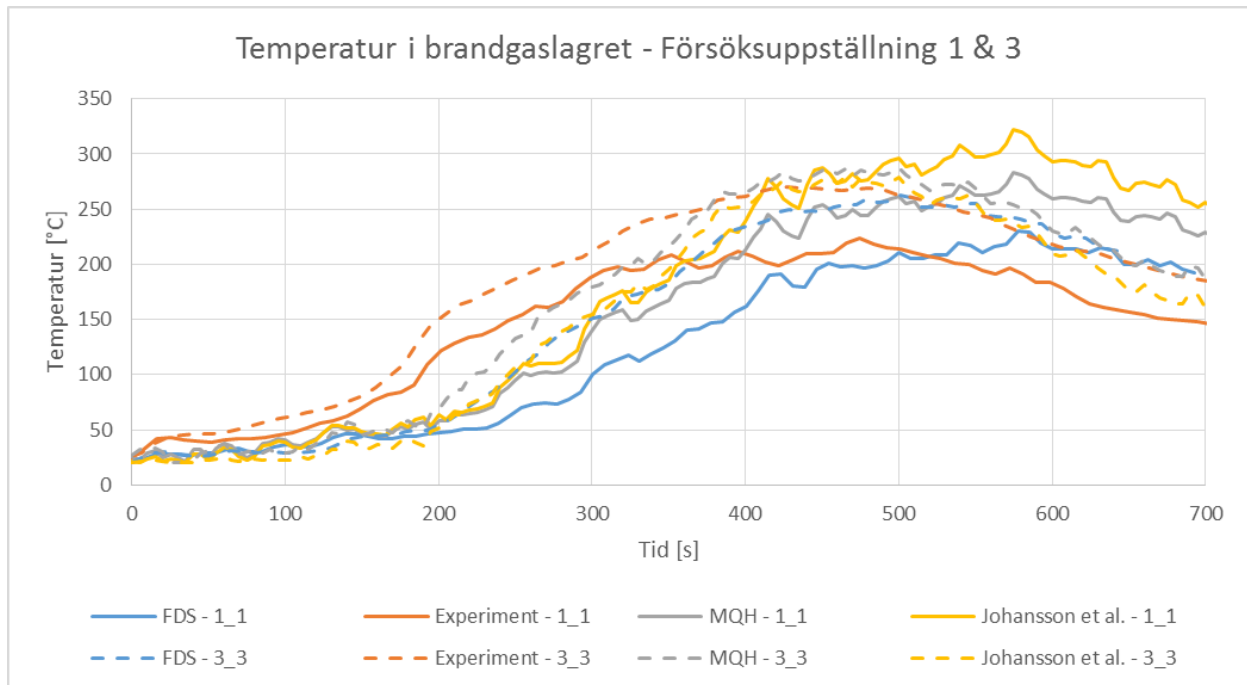
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 1 med resultaten från försöksuppställning 3. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.5.

Tabell E.5: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

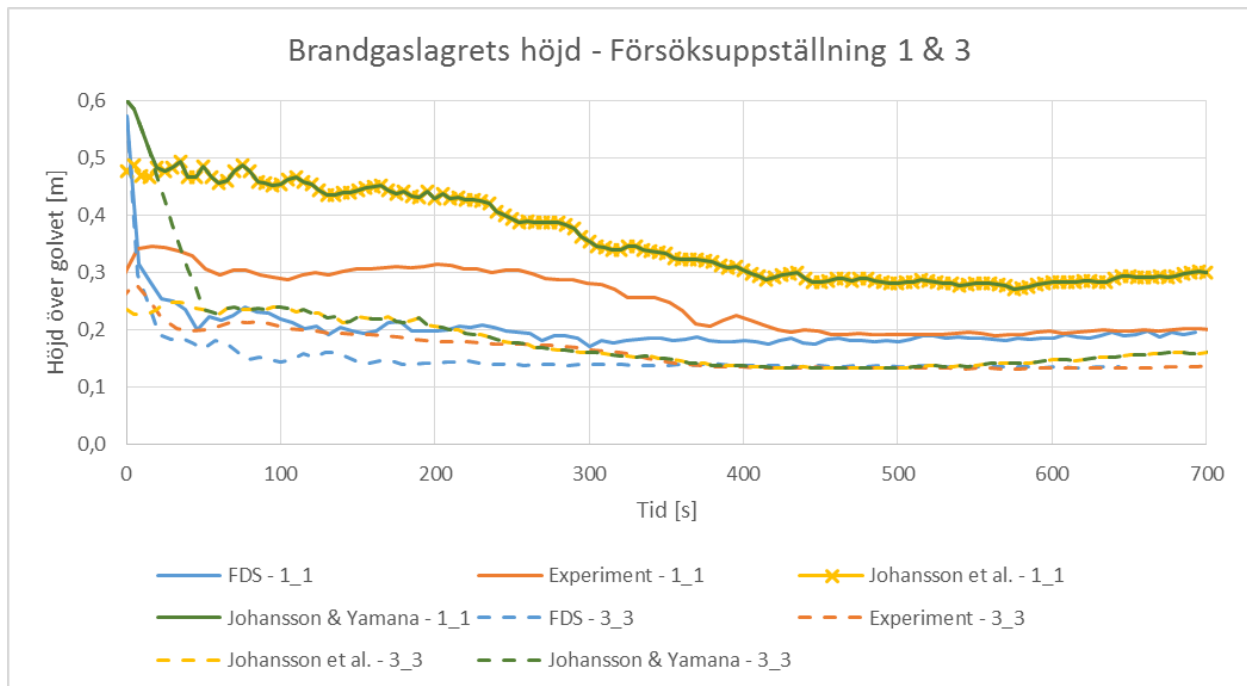
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
1	Nej	Stor	Långsam
3	Nej	Liten	Långsam



Figur E.13: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.14: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



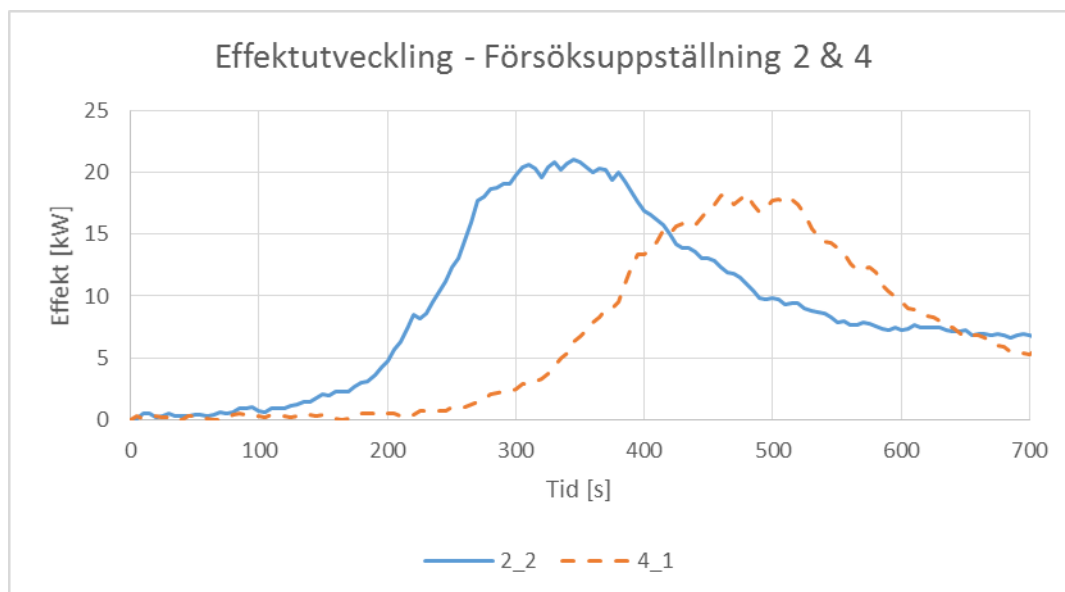
Figur E.15: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

## E.2.2 Oisolerad, snabb brand

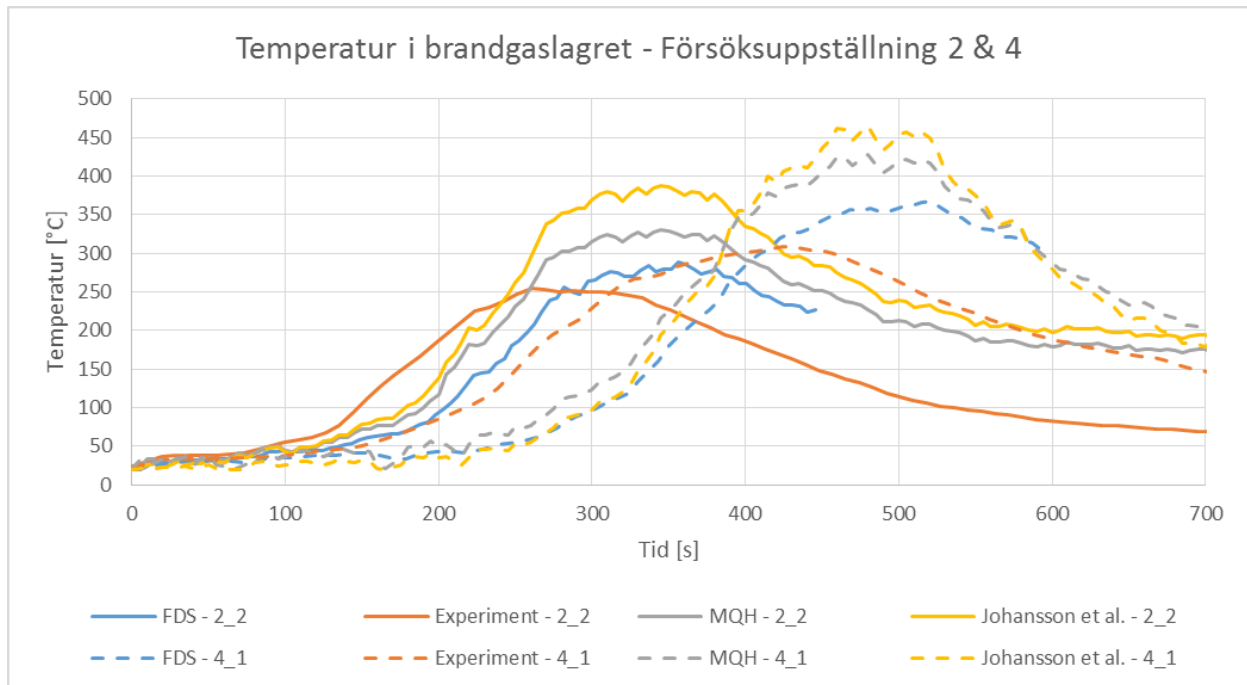
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 2 med resultaten från försöksuppställning 4. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.6.

Tabell E.6: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

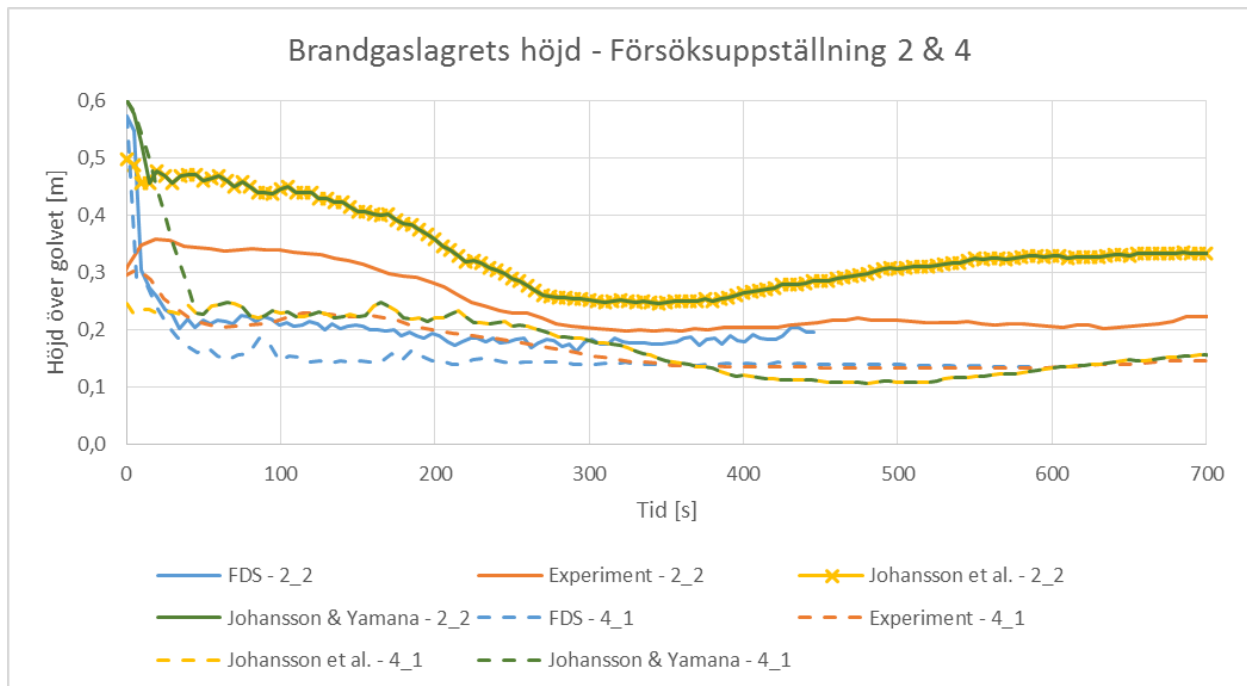
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
2	Nej	Stor	Snabb
4	Nej	Liten	Snabb



Figur E.16: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.17: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



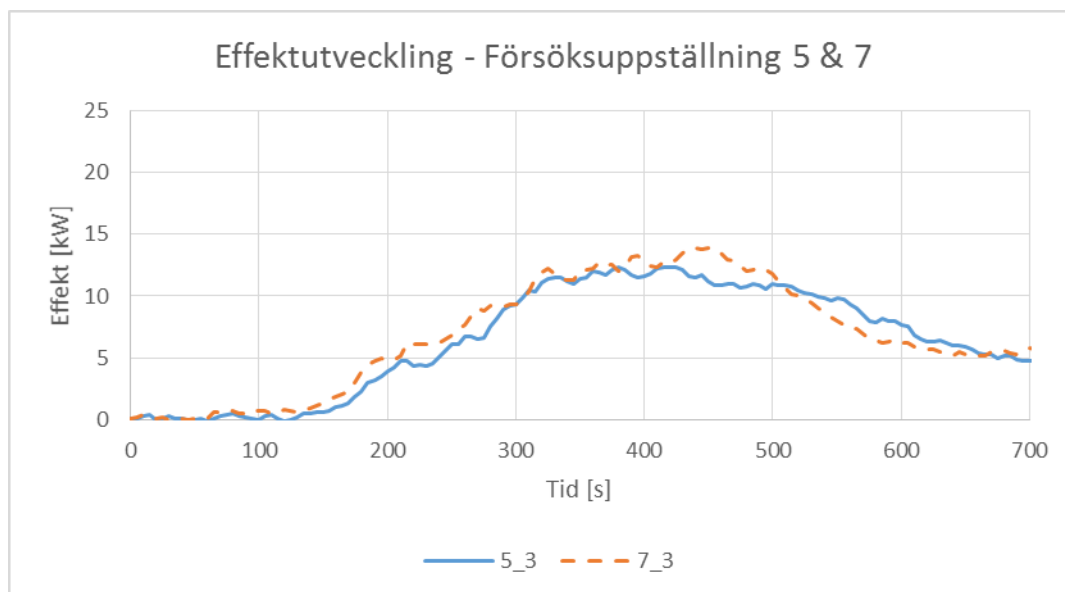
Figur E.18: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.2.3 Isolerad, långsam brand

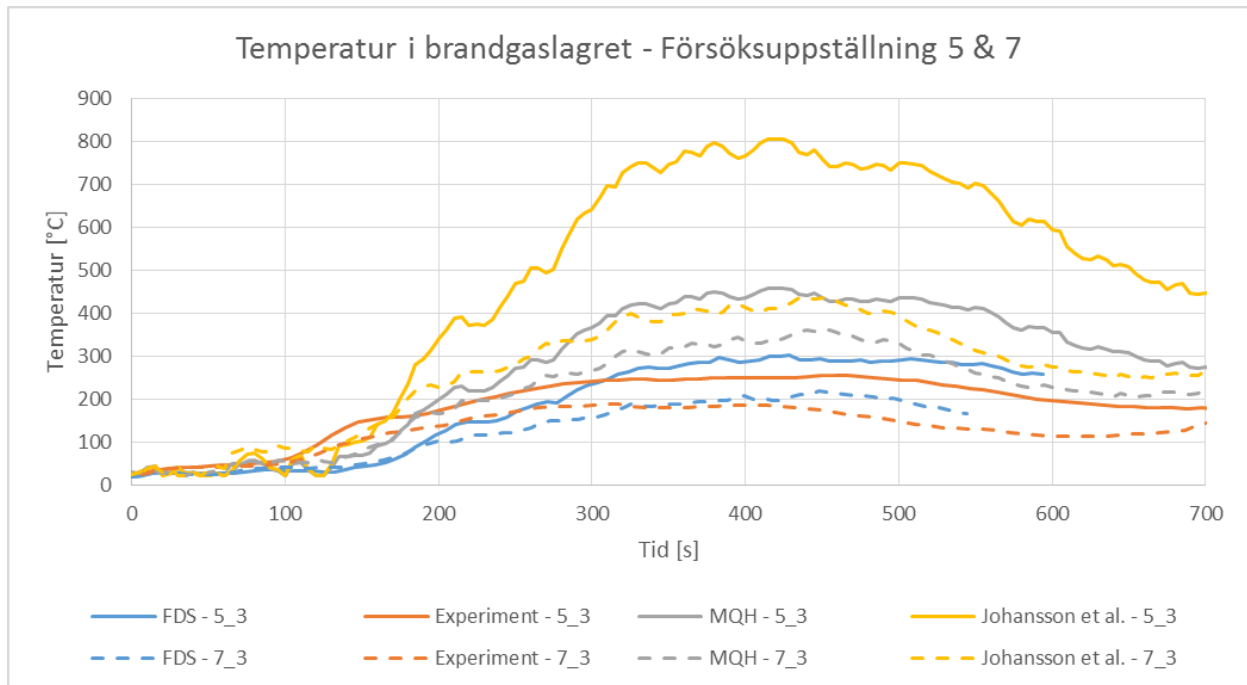
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 5 med resultaten från försöksuppställning 7. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.7.

Tabell E.7: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

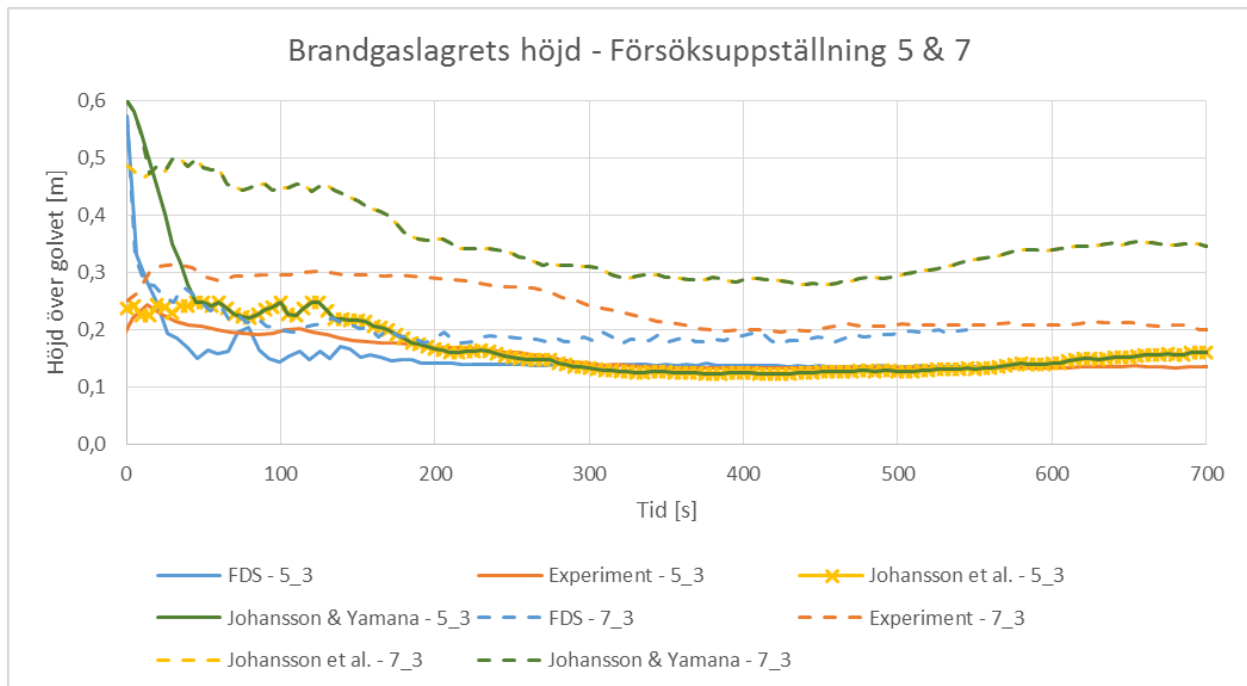
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
5	Ja	Liten	Långsam
7	Ja	Stor	Långsam



Figur E.19: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.20: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



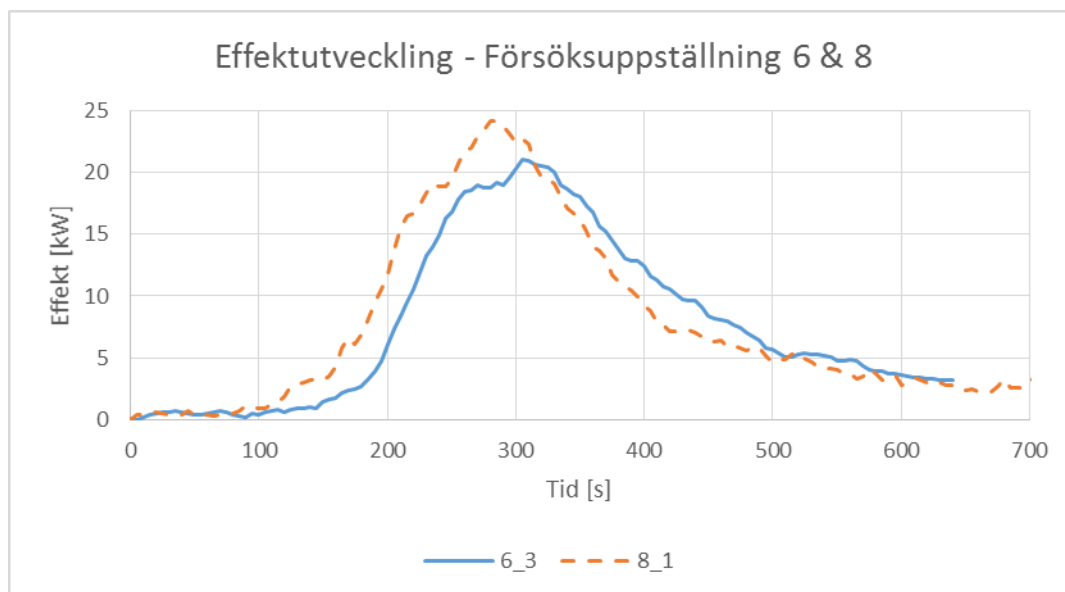
Figur E.21: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

## E.2.4 Isolerad, snabb brand

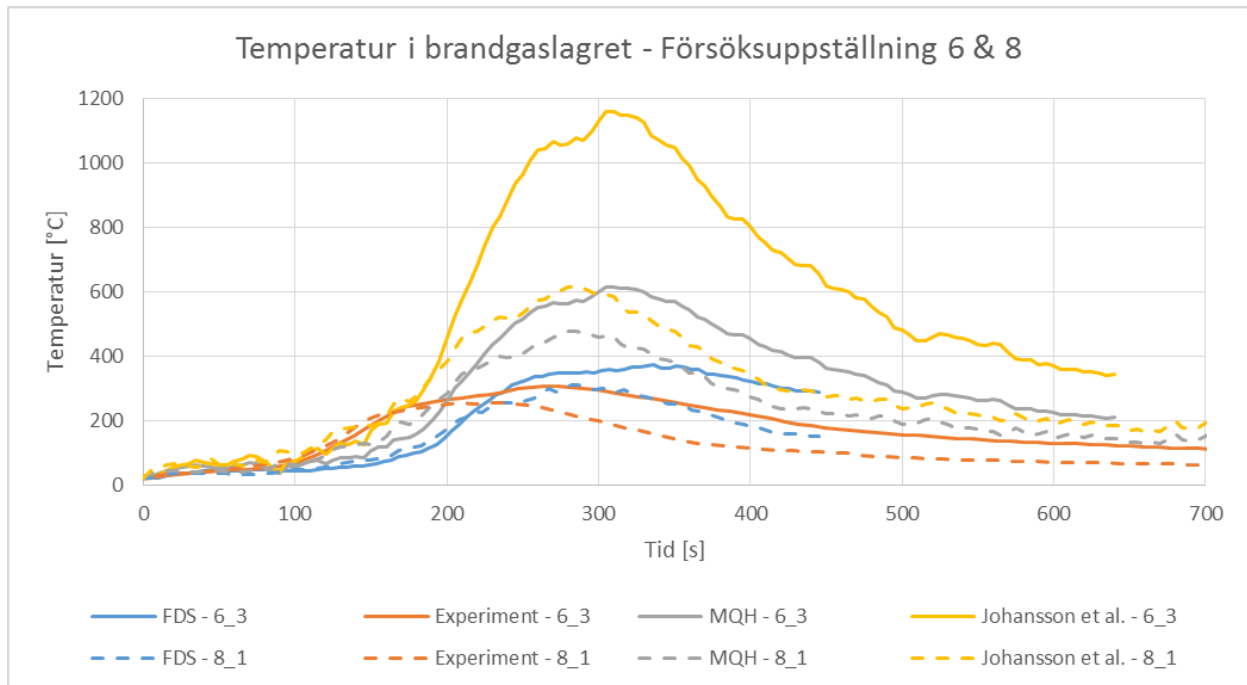
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 6 med resultaten från försöksuppställning 8. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.8.

Tabell E.8: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

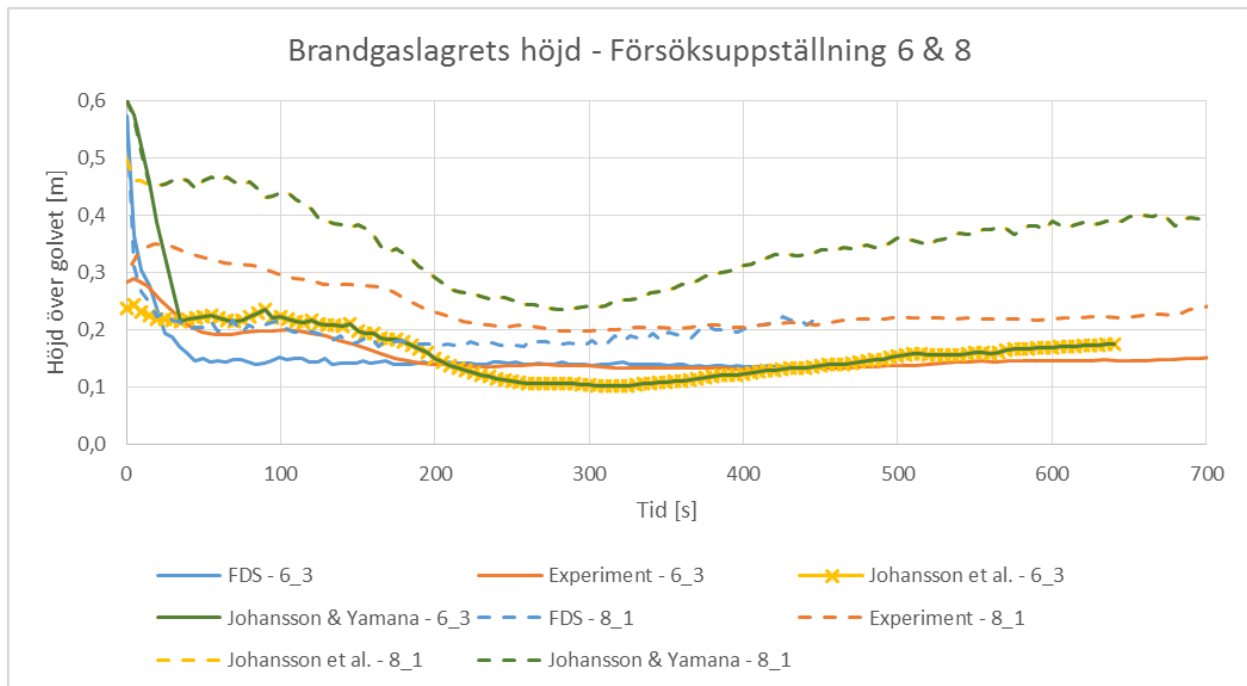
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
6	Ja	Liten	Snabb
8	Ja	Stor	Snabb



Figur E.22: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.23: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



Figur E.24: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



### E.3 Bränsleuppställning

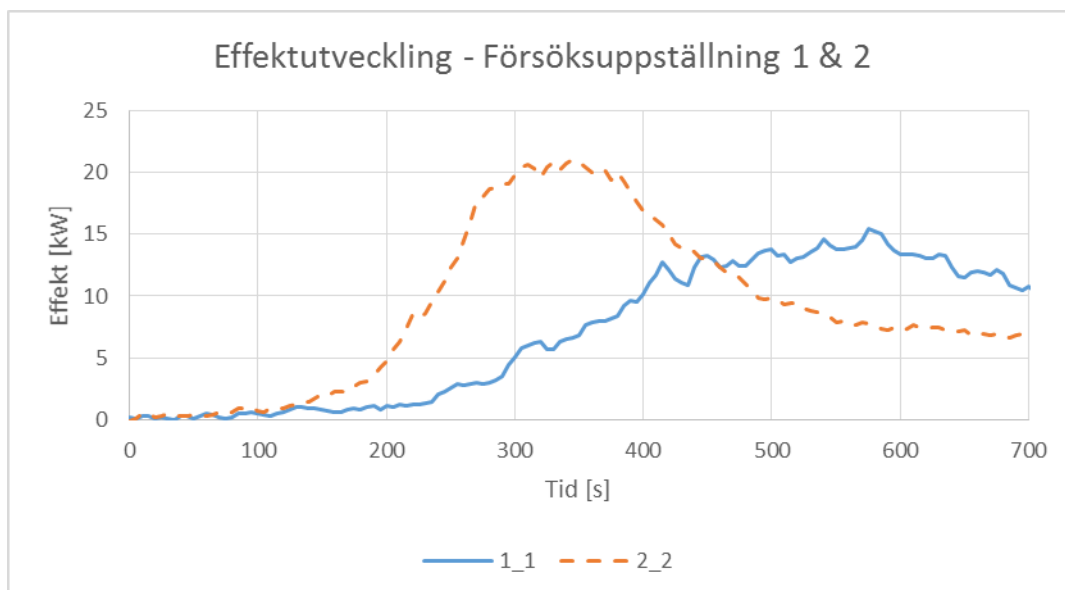
I detta avsnitt undersöks bränsleuppställningens, och därmed brandens tillväxthastighet och maxeffekts påverkan på resultatet. Detta görs genom att jämföra resultat från försöksuppställningar som förutom olika bränsleuppställning är helt lika. Jämförelsen visar bland annat att det blir något större spridning mellan de uppmätta och beräknade temperaturerna i brandgaslagret för uppställningar med en snabb brand med hög maxeffekt.

#### E.3.1 Oisolerad, stor öppning

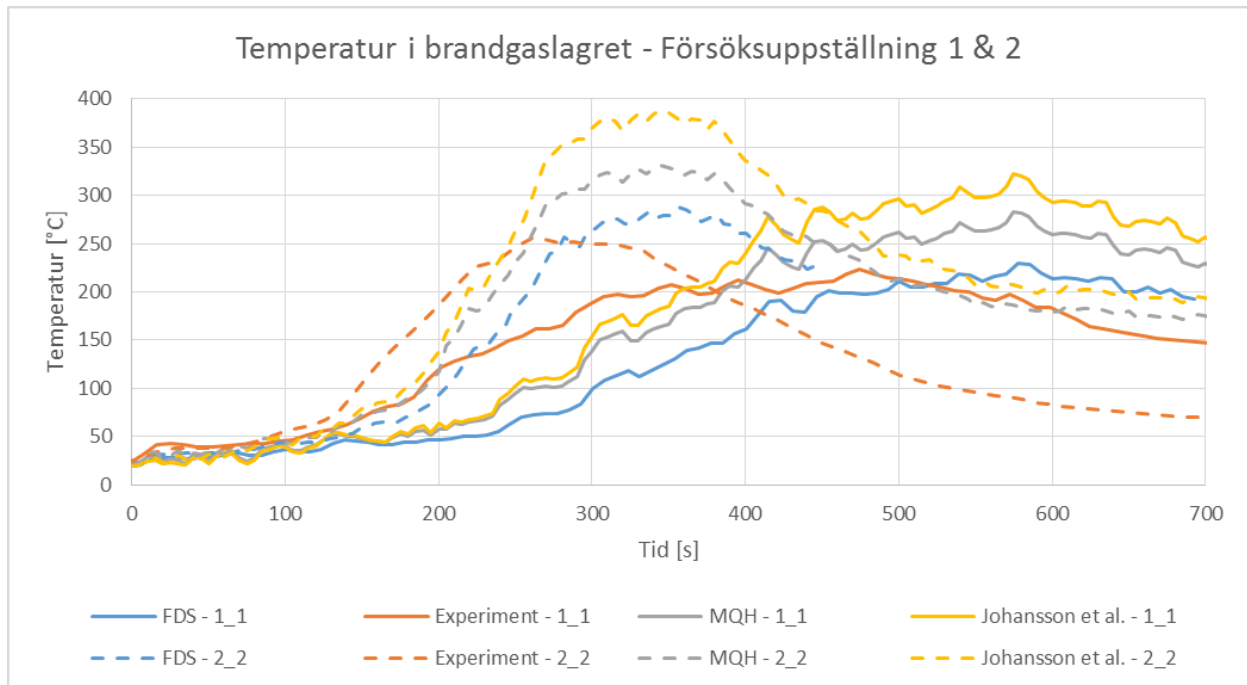
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 1 med resultaten från försöksuppställning 2. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.9.

Tabell E.9: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

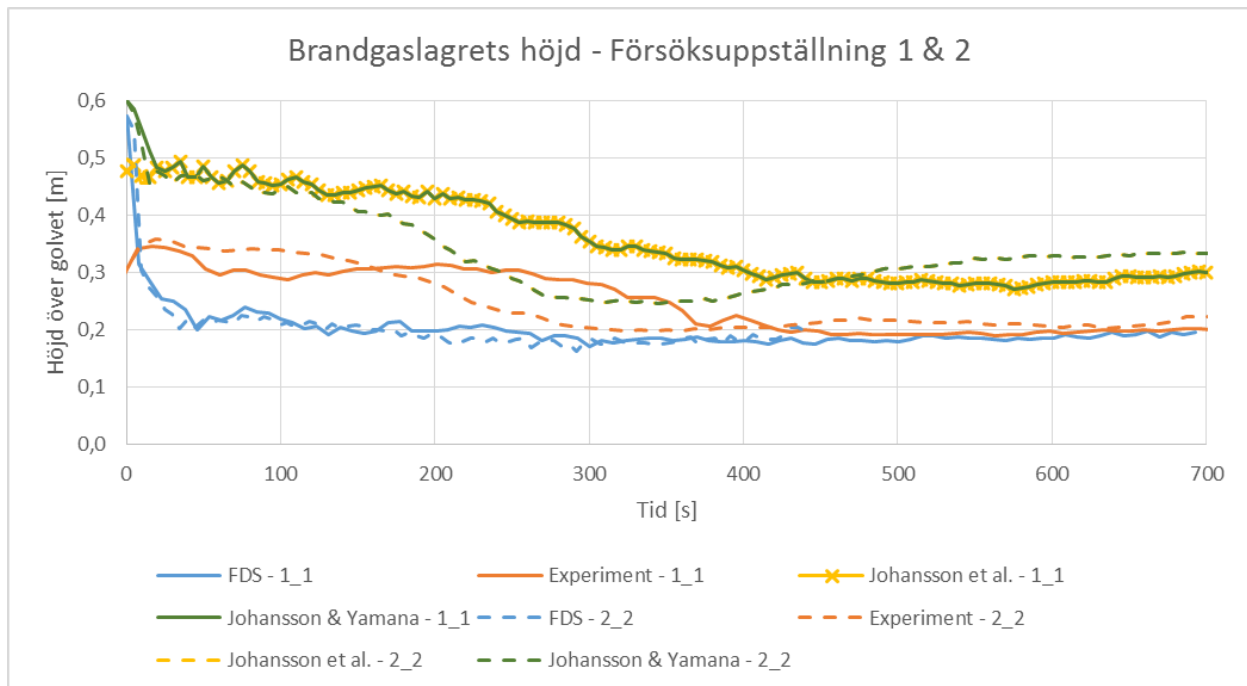
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
1	Nej	Stor	Långsam
2	Nej	Stor	Snabb



Figur E.25: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.26: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



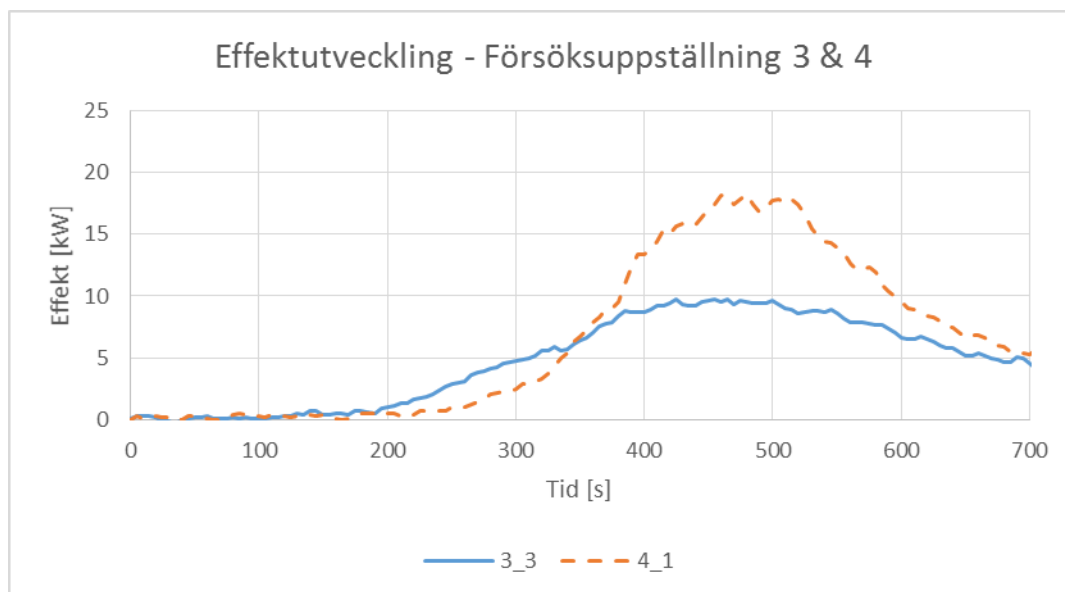
Figur E.27: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.3.2 Oisolerad, liten öppning

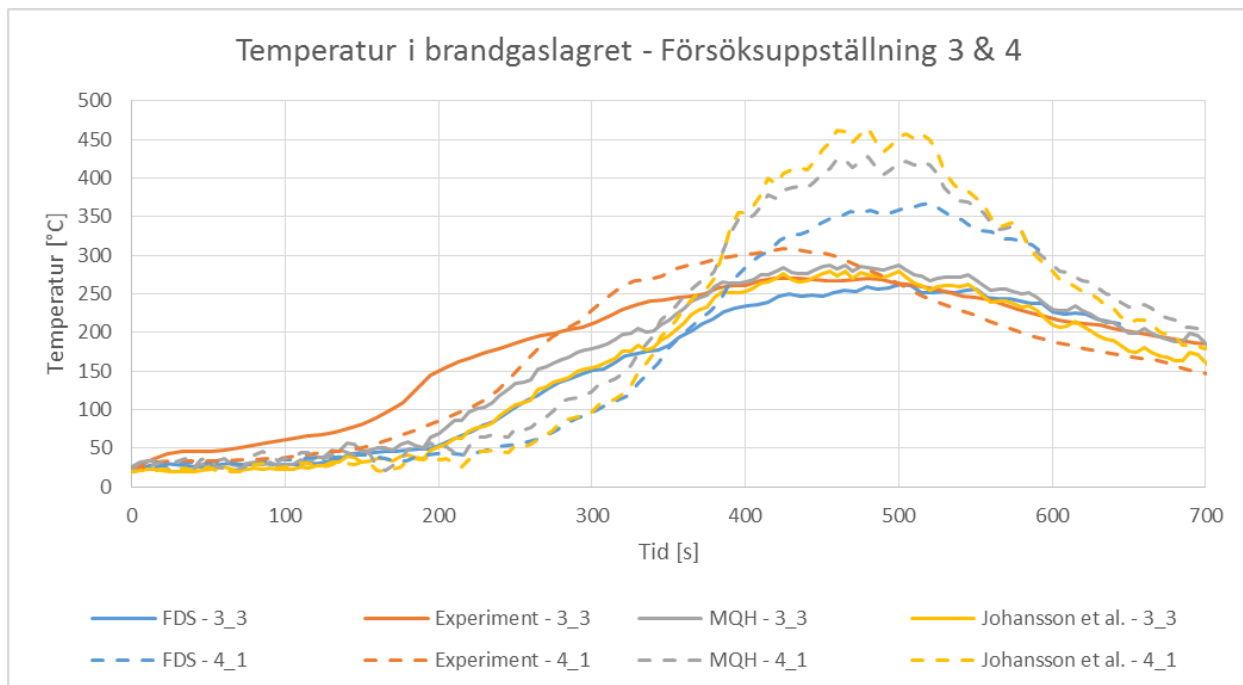
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 3 med resultaten från försöksuppställning 4. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.10.

Tabell E.10: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

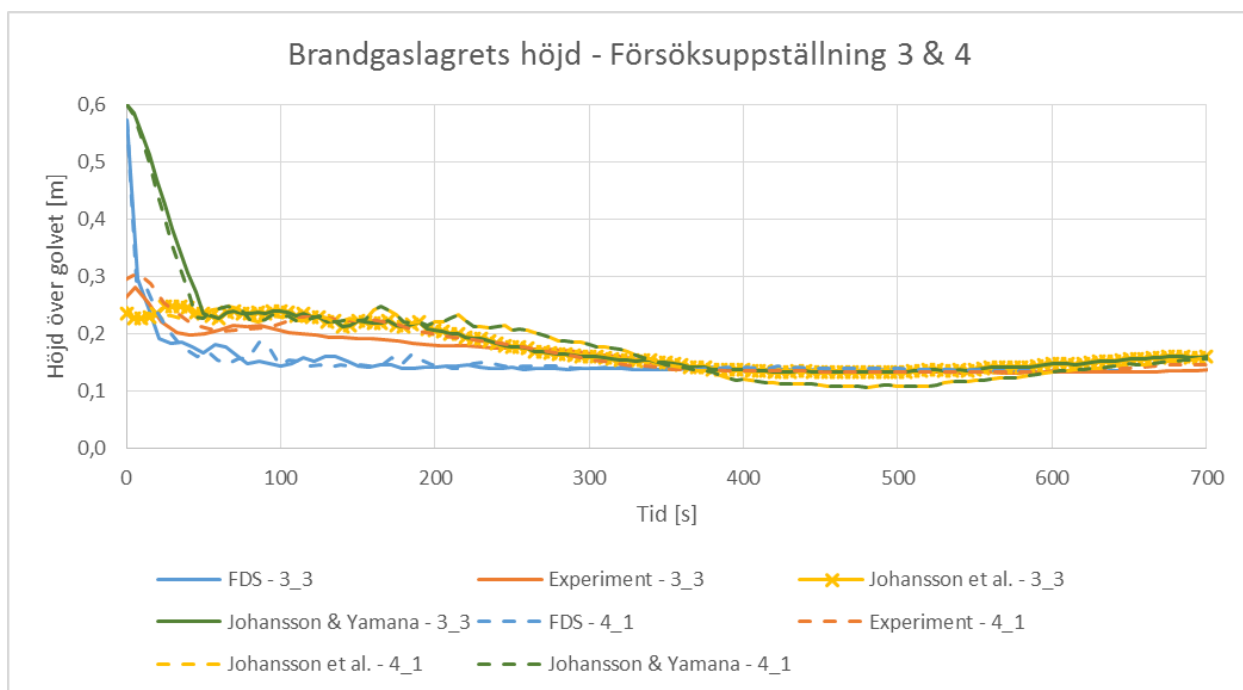
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
3	Nej	Liten	Långsam
4	Nej	Liten	Snabb



Figur E.28: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.29: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



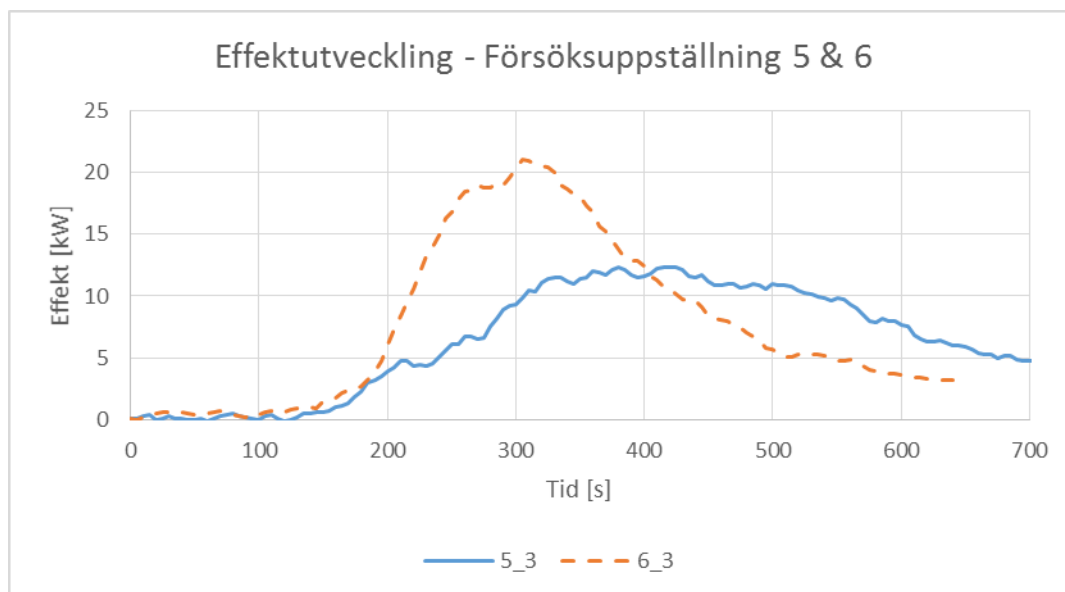
Figur E.30: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.3.3 Isolerad, liten öppning

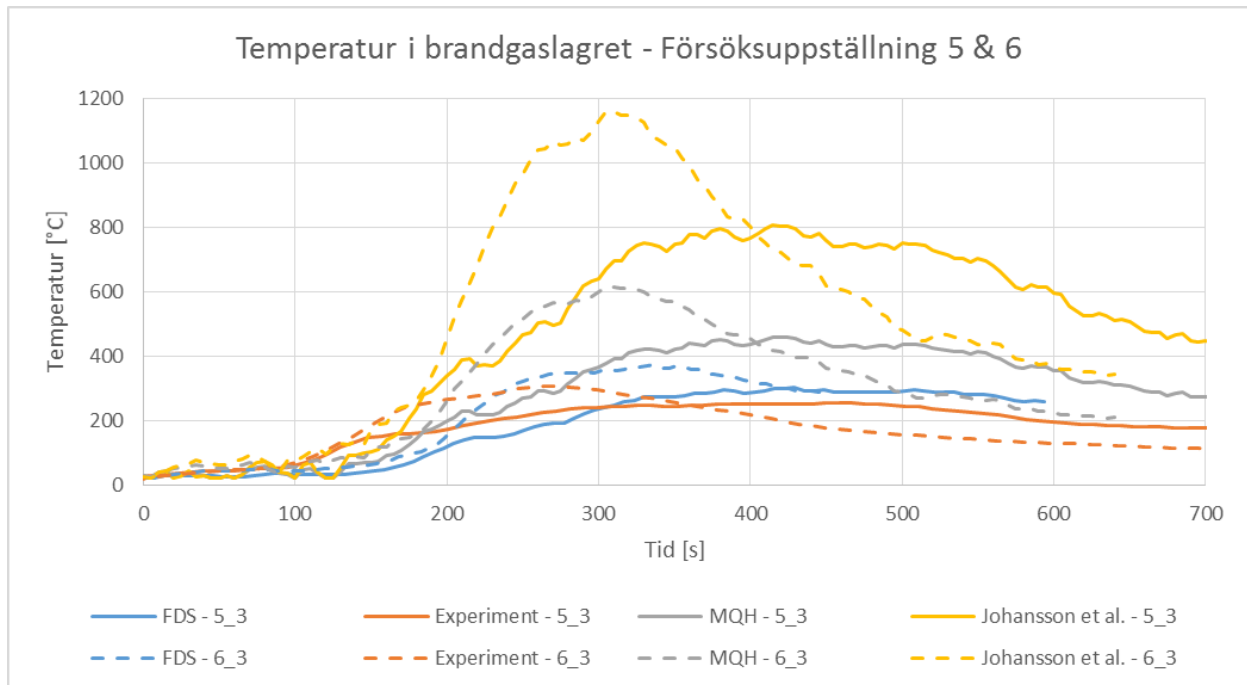
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 5 med resultaten från försöksuppställning 6. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.11.

Tabell E.11: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

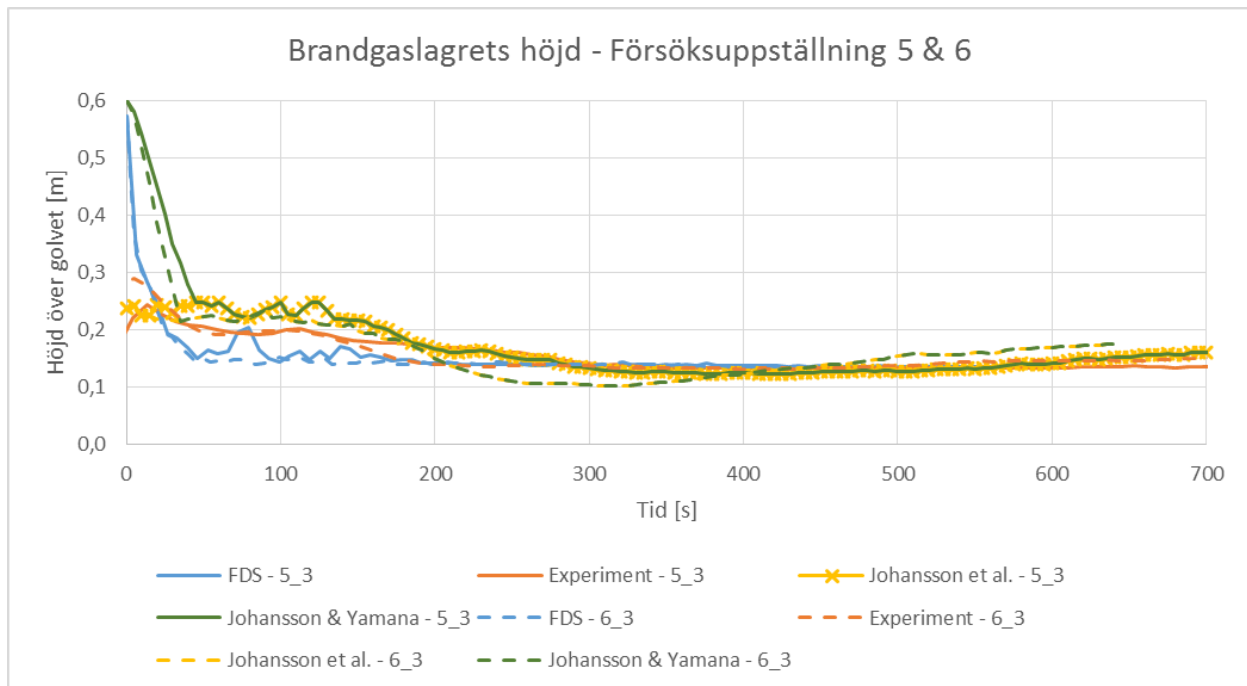
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
5	Ja	Liten	Långsam
6	Ja	Liten	Snabb



Figur E.31: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.32: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



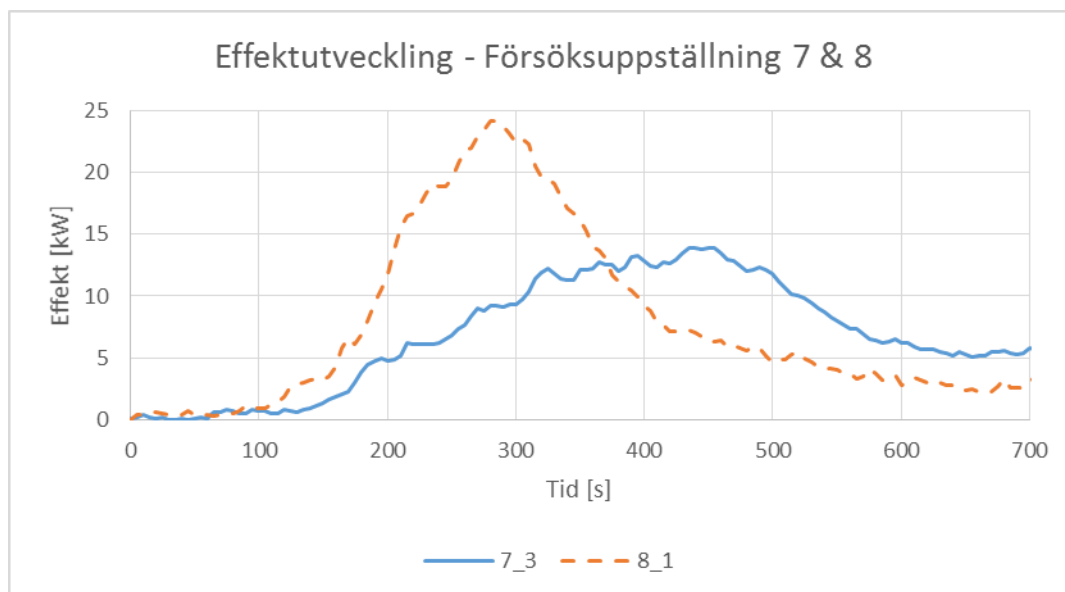
Figur E.33: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.

### E.3.4 Isolerad, stor öppning

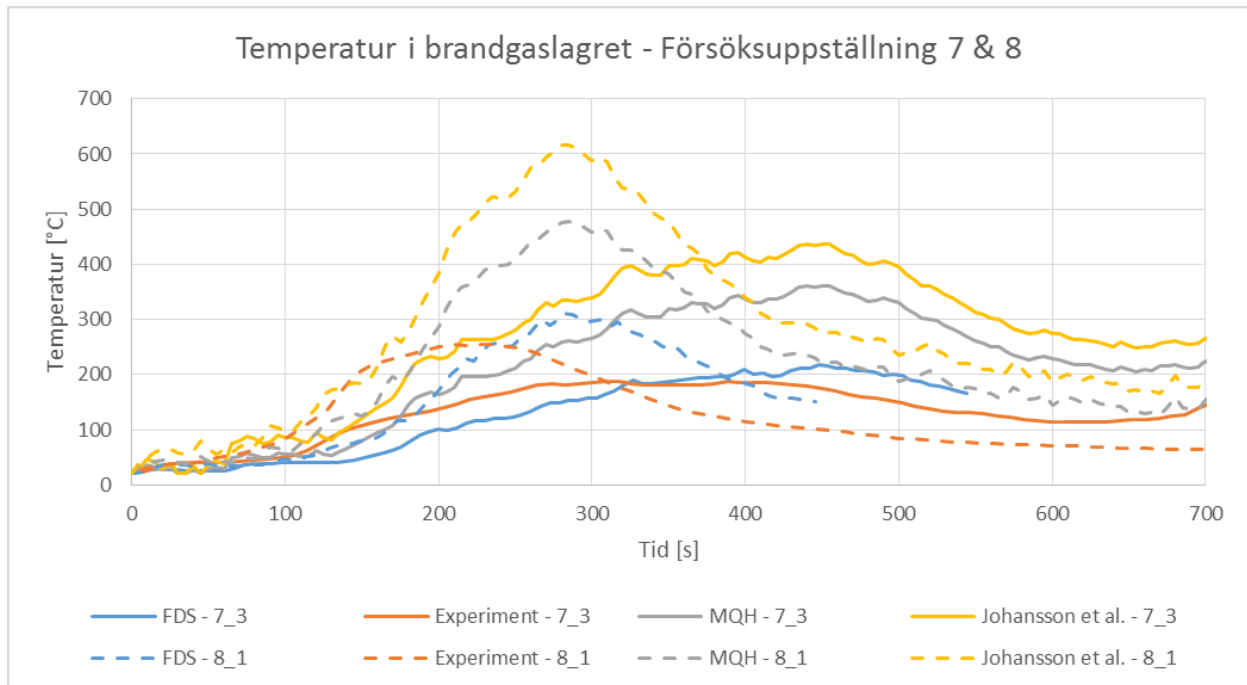
Nedan jämförs resultaten från försöksuppställning 7 med resultaten från försöksuppställning 8. Uppställningarnas konfiguration framgår av Tabell E.12.

Tabell E.12: De jämförda försöksuppställningarnas konfigurationer.

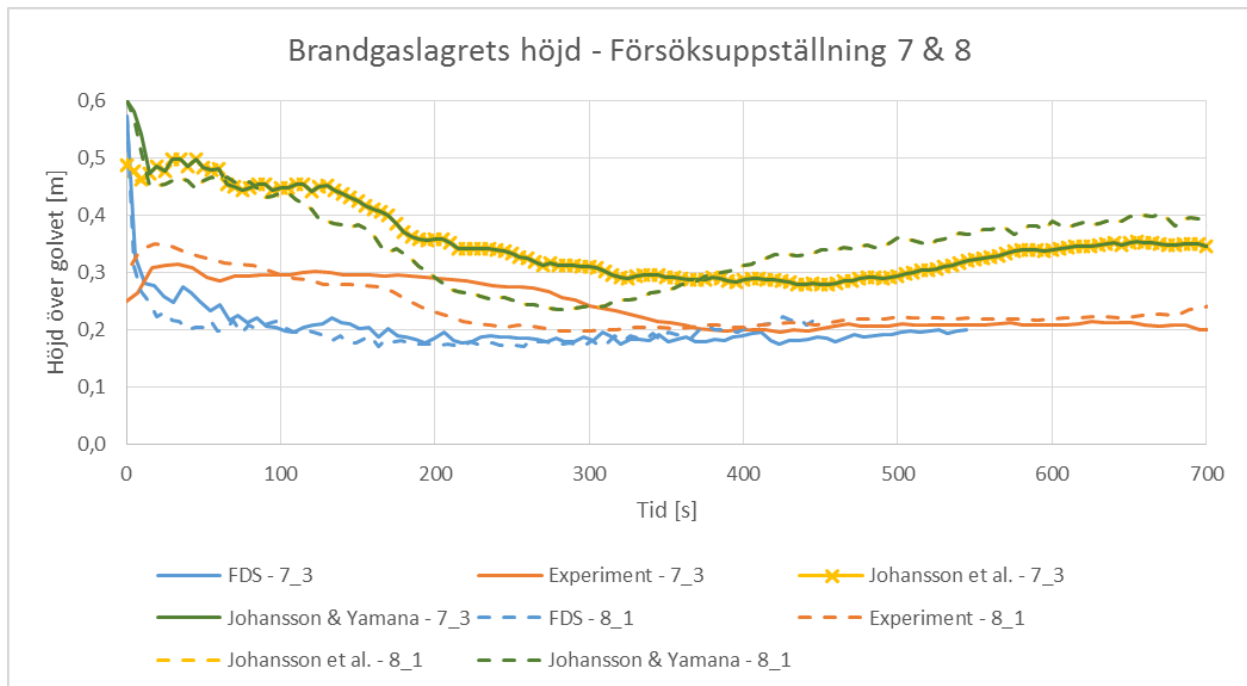
Försöksuppställning	Isolering	Öppningsstorlek	Bränsleuppställning
7	Ja	Stor	Långsam
8	Ja	Stor	Snabb



Figur E.34: Effektutvecklingskurvor för de två jämförda försöksuppställningarna.



Figur E.35: Temperaturkurvor från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



Figur E.36: Brandgaslagrets höjd över golv från experiment, simuleringar och handberäkningar för de två jämförda försöksupställningarna.



## Bilaga F Anteckningar från genomförda försök

I denna presenteras de anteckningar som gjordes när försöken genomfördes. Det framgår även i vilken ordning försöken genomfördes. Både brandgaslagrets höjd och tiden till flamma i tak är ungefärliga värden.

Ordning	Försök	Datum	Bränslevikt [kg]	Taktemperatur vid start [°C]	Antändning	Höjd på brandgaslager	Tid till flamma i tak	Notis
1	1_1	2015-09-30	0,5	23,5	Gick bra	Nådde cirka 30 cm över golvet. Ganska svårt att se	5 min	-
2	3_1	2015-09-30	0,55	27,2	Gick bra	Arbetar sig ner till typ 15 cm	5 min 20 sek	Tejpen till öppningen släppte något, ytterst lite gaser läckte ut
3	1_2	2015-10-01	0,5	22,1	Långsam, men blev bra efter en stund	-	Länge	Handledare var närvarande
4	3_2	2015-10-01	0,55	26	Gick bra, tog sig snabbt	Lägsta ca 14 cm	3 min 30 sek	-
5	2_1	2015-10-01	0,35	28,1	Gick bra!	-	2 min 30 sek	-
6	4_1	2015-10-02	0,35	20,9	Lite långsamt i början, bara 2 av 4 skorstenar tog sig bra. Sen kom det igång ordentligt	15 cm	4 min 15 sek	-
7	2_2	2015-10-02	0,35	22,2	Gick bra	ca 25cm	2 min 50 sek	-
8	4_2	2015-10-05	0,35	19,4	Lite långsamt i början, bara 2 av 4 skorstenar tog sig bra. Sen kom det igång ordentligt	15 cm	4 min 30 sek	Handledare var närvarande
9	1_3	2015-10-05	0,5	21,9	Långsamt, tog sig i de översta träribborna. Ganska jämn maxperiod	30cm	9 min 40 sek	-
10	2_3	2015-10-05	0,35	24,1	Bra	30cm	3 min	-
11	3_3	2015-10-05	0,5	25,4	Bra	15cm	4 min 10 sek	Luckan släppte lite på slutet
12	4_3	2015-10-06	0,35	21,1	Bra	15 cm	3 min 20 sek	-
13	7_1	2015-10-06	0,55	23	Bra	30 cm	5 min 20 sek	-
14	8_1	2015-10-07	0,35	19,2	Bra, det tog sig fort	30 cm	2 min 10 sek	-

Ordning	Försök	Datum	Bränslevikt [kg]	Taktemperatur vid start [°C]	Antändning	Höjd på brandgaslager	Tid till flamma i tak	Notis
15	8_2	2015-10-08	0,35	19,8	Bra, det tog sig fort	30 cm	2 min 15 sek	-
16	7_2	2015-10-08	0,5	21,8	Bra	30 cm	3 min 30 sek	-
17	6_1	2015-10-08	0,35	22,3	Bra	15 cm	2 min	-
18	5_1	2015-10-08	0,5	23	Bra	13 cm	3 min 45 sek	Lite lägre lager än tidigare
19	6_2	2015-10-09	0,35	22,5	Bra	13 cm	2 min 10 sek	Brandgaslagret nuddade nästan de översta ribborna i bränsleuppställningen.
20	8_3	2015-10-09	0,35	25,4	Bra, dock på andra tändstickan.	25 cm	2 min 45 sek	Nya pappret som är något tjockare än det förra
21	5_2	2015-10-09	0,5	26,8	Bra	13 cm	3 min 10 sek	-
22	7_3	2015-10-09	0,5	21,3	Bra	ca 30 cm	3 min 30 sek	Svårt att bestämma brandgaslagrets höjd.
23	6_3	2015-10-13	0,35	19,1	Bra	13 cm	2 min 15 sek	Handledare var närvarande
24	5_3	2015-10-13	0,5	24,5	Bra	13 cm	3 min 40 sek	-