

# **Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök**

*Oscar Lilja*

---

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

**Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet**

**Report 5476, Lund 2014**



# **Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök**

**Oscar Lilja**

**Lund 2014**

Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök  
Uncertainty caused by the scaling of fire experiments

Oscar Lilja

**Report 5476**

**ISSN: 1402-3504**

**ISRN: LUTVDG/TVBB—5476--SE**

Number of pages: 54

Illustrations: Created by the author unless something else has been mentioned.

Keywords

Scaling, Froude scaling, uncertainty, functional analysis, FDS

Sökord

skalning, froude skalning, osäkerhet, funktionalanalys, FDS

Abstract

The aim of this report was to investigate the effects on temperature when scaling down an experiment within the area of fire safety engineering. This was done by performing a literature review and by comparing results from FDS 6 simulations in full scale with simulation results in scale 1:4.

To properly scale an experiment it is necessary to take the fire power as well as the heat losses from the model into account, and also making sure that the flow is turbulent as it would be in full scale. The magnitude of the error on temperature caused by scaling is influenced by how much you scale the model, the experimental set up and where you make the measurements. From the literature review and the simulations it was possible to notice some patterns. A model of a compartment fire before flashover, scaled down by a factor of 2, seems to have an error of around 10 %. Scaled down by a factor of 4 the error lies between 10 % and 20 %. In an adjoining room the error may be larger, up to 30 %. In the lower, cooler part of the room the error is smaller and overall the temperatures in scaled down models seem to be underestimating the temperatures.

Författaren ansvarar för innehållet i rapporten.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2014.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[brand@brand.lth.se](mailto:brand@brand.lth.se)  
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

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

[brand@brand.lth.se](mailto:brand@brand.lth.se)  
<http://www.brand.lth.se>

Telephone: +46 46 222 73 60

## Sammanfattning

Möjligheten att använda sig av nedskalade modeller vid brandtekniska försök har utnyttjats länge. Det finns både kostnadsmässiga och praktiska fördelar så som att det blir lättare att kontrollera ett försök när en nedskalad modell används. Skalningen sker utifrån dimensionslösa grupper som ska bevara försökets förutsättningar från fullskalan till den mindre skalan. Det är dock inte möjligt att bevara alla dimensionslösa grupper som är applicerbara vid ett brandtekniskt försök och skalningen som utförs är därmed ofullständig. Att avgöra hur stort felet är för resultat inhämtade i en mindre skala på grund av det kan vara svårt.

Syftet med rapporten var därför att försöka komma fram till hur skalning ska ske och avgöra vilka effekter skalning får. Mer specifikt var målet att se hur stor osäkerhet som introduceras när ett försök genomförs i en nedskalad uppställning.

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att först undersöka hur skalningen ska genomföras för att de viktigaste aspekterna av ett brandtekniskt experiment ska bevaras. Dessutom undersöktes litteratur som behandlade hur väl resultat från modeller i en större skala stämde överens med resultat från modeller i mindre skalor. Med utgångspunkt i en tidigare genomförd försöksserie i skala 1:4 skapades två scenarier som simulerades både i skala 1:4 och fullskala i FDS 6.1.1. Scenarierna bestod av två sammansatta rum med en öppning mellan och en öppning ut från det yttre rummet. I det inre rummet fanns en brand placerad i mitten. Temperaturmätningar från simuleringarna i skala 1:4 jämfördes först med de utförda försöken för att avgöra hur väl scenarierna lyckades simuleras. Därefter jämfördes temperaturmätningar mellan simuleringarna i skala 1:4 och fullskala. Utifrån dessa jämförelser och med hjälp av litteraturstudien drogs sedan slutsatser om hur stort fel som går att förvänta sig för temperaturen vid ett skalat försök. Jämförelserna utfördes med hjälp av funktionalanalys.

När ett brandtekniskt experiment ska skalas ned är det dels viktigt att justera hur stor effektutveckling som används, men det är också viktigt att ta hänsyn till värmeförlusterna. Eftersom att det inte är möjligt att använda alla skalnings samband är det viktigt att välja lämpliga samband och motivera dessa val. Även om Reynolds tal inte skalas är det nödvändigt att bevara de turbulenta förhållandena från fullskalan.

Storleken på felet som orsakas av skalningen visade sig beroende av hur kraftigt skalad modellen var, hur försöksuppställningen såg ut och var mätningen utfördes. De flesta försöksuppställningar som tidigare använts för att avgöra storleken på felet orsakat av skalning liknar de scenarier som undersöks i rapporten och de slutsatser som dras gäller rumsbränder innan övertändning med en öppning ut i dörrstorlek. Med stöd i dessa och utifrån de scenarier som undersökts bedömdes felet för temperaturen i en modell som skalats ned med en faktor 2 att ligga kring 10 % i brandrummet. För en modell som skalats ned med en faktor 4 bedöms felet ligga mellan 10 % och 20 % i brandrummet och i ett intilliggande rum upp till 30 %. Värdena avser mätningar i det varma brandgaslagret och i den svalare delen av rummet bedöms felet vara något mindre. Generellt sett verkar temperaturerna ha underskattats i de nedskalade modellerna.

## Nomenklatur

$c$	Värmekapacitet (J/kgK)
$D^*$	Dimensionslös diameter (-)
$dx$	Cellstorlek i FDS (m)
$E$	Resultatserie
$E_i$	Värde i resultatserie vid tidpunkten $i$
$g$	Tyngdaccelerationen (9,82 m/s <sup>2</sup> )
$h_c$	Konvektivt värmeövergångstal (W/m <sup>2</sup> K)
$k$	Värmeledningsförmåga (W/mK)
$l$	Längd (m)
$m$	Resultatserie
$m_i$	Värde i resultatserie vid tidpunkten $i$
$p$	Tryck (Pa)
$\hat{p}$	Dimensionslöst tryck (-)
$Q$	Effektutveckling (kW)
$\dot{q}_r$	Strålningseffekt (kW)
$s$	Antal mätpunkter
$t$	Tid (s)
$T$	Temperatur (K)
$\hat{T}$	Dimensionslös temperatur (-)
$T_\infty$	Omgivande temperatur (K)
$u$	Hastighet (m/s)
$\hat{u}$	Dimensionslös hastighet (m/s)
$X_r$	Strålningsfraktion (-)
$x_i$	Koordinat
$Y_i$	Ämneskoncentration vid tidpunkten $i$
$Y_{i,\infty}$	Omgivande ämneskoncentration vid tidpunkten $i$
$\rho$	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_\infty$	Omgivande Densitet (kg/m <sup>3</sup> )
$\kappa$	Strålningsabsorptionskoefficient
$\sigma$	Stefan – Boltzmanns konstant (5,67 · 10 <sup>-11</sup> kW/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\delta_w$	Väggjocklek (m)
$\Pi$	Dimensionslös grupp

# Innehåll

Sammanfattning.....	5
Nomenklatur.....	6
Innehåll.....	7
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Mål och syfte.....	1
1.3 Frågeställningar.....	1
1.4 Metod.....	2
1.5 Avgränsningar.....	2
2 Teori.....	5
2.1 Skalningsteori.....	5
2.2 Computational Fluid Dynamics, CFD.....	6
2.3 Osäkerhet vid experimentella försök.....	7
2.4 Funktionalanalys.....	8
3 Exempel på användning av skalning.....	11
3.1 Avvikelser orsakade av skalning.....	11
4 Försöksuppställning.....	15
4.1 Scenarier som behandlas i rapporten.....	16
5 Simuleringar.....	19
5.1 Materialparametrar och effektutveckling.....	19
5.2 Känslighetsanalys.....	20
6 Resultat.....	23
6.1 Jämförelse mellan försök och simuleringar i skala 1:4.....	23
6.2 Jämförelse mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala.....	27
6.3 Känslighetsanalys.....	32
7 Analys.....	35
7.1 Funktionalanalys.....	35
7.2 Jämförelse av försök och simuleringar.....	35
7.3 Jämförelse av simuleringar i fullskala och skala 1:4.....	36
8 Diskussion.....	39
8.1 Frågeställning 1.....	39
8.2 Frågeställning 2.....	39
8.3 Frågeställning 3.....	41
9 Slutsatser.....	43
10 Förslag till fortsatta studier.....	45
11 Litteraturlista.....	47
Bilagor.....	49





## 1 Inledning

Rapporten utgör resultatet av kursen *Examensarbete i Brandteknik VBRM01* och är den avslutande delen i Brandingenjörsutbildningen vid Lunds Tekniska Högskola. I kursen ska kunskaper från utbildningen användas för att angripa ett problem inom det brandtekniska området på ett självständigt och ingenjörsmässigt sätt.

Det övergripande ämnet för examensarbetet är skalning vid brandförsök och mer specifikt hur resultaten från skalade försök har påverkats av skalningen. Arbetet har utförts självständigt genom litteraturstudier och simuleringar med stöd från handledare (Nils Johansson) vid LTH.

### 1.1 Bakgrund

Användningen av skalmodeller är vanlig inom många områden där flödesdynamik studeras på ett eller annat sätt. Själva principen med skalning går ut på att behålla dimensionslösa grupper konstanta. Ett vanligt exempel är vid utvecklingen av flygplan där skalade modeller testas i vindtunnlar. Skalningen kan då ske genom att hålla Reynolds tal konstant (Quintiere, 2006). I brandtekniska sammanhang finns det begränsningar med skalningen. Det går inte att bevara alla dimensionslösa grupper, men genom att förstå deras roll går det att hantera det huvudsakliga problemet (Quintiere, 2012).

Skalade experiment har använts dels för att kunna ta fram empiriska samband för olika brandrelaterade fenomen men också som ett verktyg då bränder som förekommit ska utredas. Skalade försök har genomförts bland annat vid utredningen av diskoteksbranden i Göteborg (Ingasson, et al., 2001) och Kings Crossbranden i England (Moodie & Jagger, 1992) där de skalade försöken gav en kvalitativ bild av brandspridningen samt kvantitativa data som kunde relateras till fullskalan. Svenska SP har använt sig av skalade försök för att studera tunnelbränder på ett praktiskt sätt (Ingasson & Li, 2010) vilket har gett resultat som visar upp samma mönster som vid fullskaleförsök.

Att använda modeller i mindre skala i brandsammanhang innebär dels kostnadsmissiga fördelar men också själva genomförandet av experimenten kan underlättas. Turbulens, förbränning, bildning av sot och så vidare behöver heller inte modelleras separat som ifall en datormodell skulle användas, dessa fenomen förekommer redan naturligt även i den skalade modellen (Johansson, 2013). Trots fördelarna med att använda sig av nedskalade modeller så kvarstår det faktum att skalningen är ofullständig vilket gör det svårt att avgöra hur stort fel som introduceras då skalning sker.

### 1.2 Mål och syfte

Syftet med detta examensarbete är att se hur skalning sker inom brandtekniken och vilka effekter skalningen kan få. Målet är att genom jämförelser av experimentella resultat och simuleringar kunna se hur stor osäkerhet som introduceras när experiment har skalats.

### 1.3 Frågeställningar

Inom ramen för examensarbetet kommer följande frågeställningar att beaktas:

1. Hur ska skalning ske för att de viktigaste aspekterna av ett brandtekniskt experiment ska bevaras?
2. Vilken kunskap finns i dagsläget angående graden av osäkerhet som orsakas av skalning i brandtekniska experiment?
3. Hur stort kan felet förväntas bli för temperaturen då skalning används i ett brandtekniskt experiment?

Att frågeställning tre inriktar sig på temperaturen beror på att den bedöms vara vanligast att mäta vid försök och att den är viktig för att till exempel kunna avgöra när övertändning ska ske.

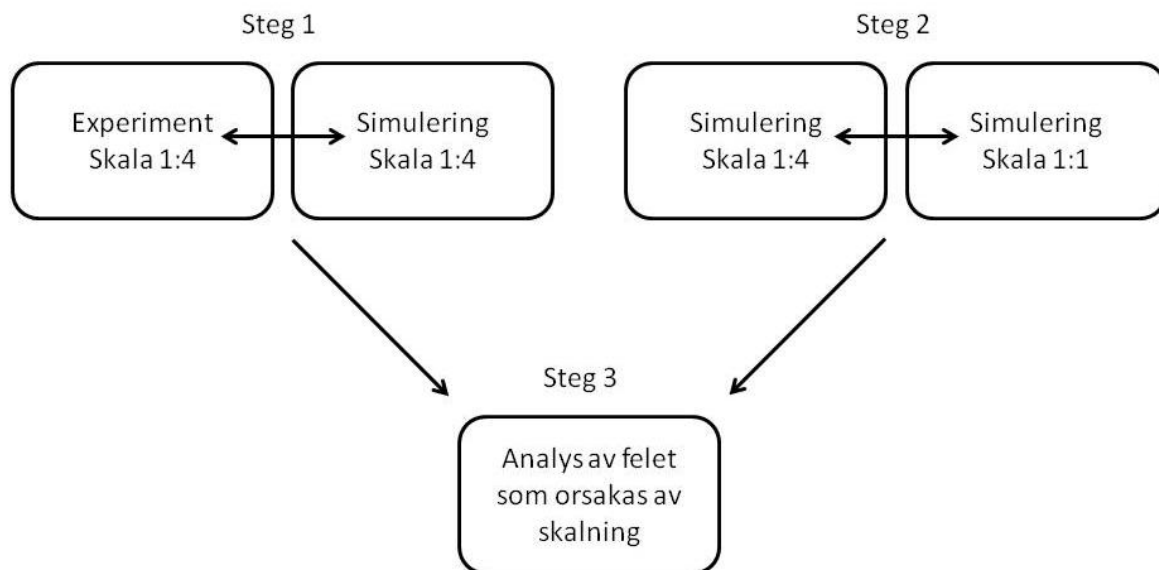
## 1.4 Metod

För att kunna ta fram svar på frågeställning 1 och 2 inleds arbetet med att gå igenom relevant litteratur på området. Hur litteratursökningen gick till går att läsa i bilaga 1. Litteraturen ska förutom att ge svar på de två första frågorna även ge en introduktion till området.

Fråga 3 kommer att besvaras genom att utföra simuleringar och analysera resultaten från dessa tillsammans med resultat från tidigare utförda experiment. Experimenten är utförda i skala 1:4 och simuleringar av de genomförda experimenten kommer dels att utföras i samma skala, men också i skala 1:1. För att anpassa effektutveckling och så vidare kommer skalningsregler användas då simuleringen i skala 1:1 sätts upp.

Analysen som ska leda fram till ett svar på frågeställning 3 kommer att genomgå följande tre steg vilket även illustreras i figur 1:

1. Först jämförs de experimentella resultaten (skala 1:4) med resultaten från simuleringarna i skala 1:4. Detta för att kunna se hur stor skillnaden är mellan dessa.
2. I det andra steget jämförs resultaten från simuleringarna i skala 1:4 och 1:1.
3. Det sista steget går ut på att väga samman de två tidigare jämförelserna. Målet med det steget är att ta reda på hur stor skillnaden skulle vara för temperaturen då ett faktiskt experiment utförs i skala 1:4 jämfört med om det utförs i skala 1:1.



**Figur 1.** Figuren visar i vilka analyser och jämförelser som ska genomföras och i vilken ordning de ska göras.

Ifall försök i fullskala hade genomförts kunde analysen ha genomförts i ett steg där resultaten mellan skalorna jämförs direkt. Då den möjligheten inte fanns och simuleringar var tvungna att användas delades analysen upp i tre delar. Målet med analysens tre delar är detsamma som ifall försök hade kunnat utföras direkt; att få en bild av storleken på felet för temperaturerna vid skalade försök.

Resultatet av det genomförda arbetet finns presenterat i den här rapporten. Arbetet presenterades även på ett offentligt seminarium vid Brandteknik i Lund under december 2014.

## 1.5 Avgränsningar

Examensarbetet kommer inte att behandla skalning inom några andra discipliner än brandtekniken. De jämförelser som utförs kommer att utgå ifrån en försöksserie genomförd av

Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

Nils Johansson, Brandteknik LTH. I försöksserien förekom ett flertal olika uppställningar, enbart resultat från ett begränsat antal av dessa kommer användas.

I arbetet ingår ingen härledning av olika skalningssamband.

Oscar Lilja  
*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

## 2 Teori

Teoriavsnittet utgör en bas för rapporten. Det ges en introduktion till skalningen för att skapa en grundläggande förståelse för ämnet där även några dimensionslösa grupper presenteras. I metoden framgår att experimentella resultat kommer att jämföras med simuleringsresultat framtagna med CFD-programvara och därför finns även ett avsnitt om osäkerhet vid experimentella mätningar med samt ett avsnitt om CFD. Även metoden som används för att jämföra resultaten, funktionalanalys, presenteras.

### 2.1 Skalningsteori

Inom brandtekniken har skalade experiment genomförts redan i början av 1900-talet (Quintiere, 1989) och det är en fortsatt vanlig metod att genomföra experiment på idag. Skalning av experiment har sin vetenskapliga grund i dimensionsanalysen. Dimensionslösa grupper så som Reynolds tal och Froudes tal kan tas fram genom att omvandla kontinuitetsekvationer för bland annat energins och rörelsemängdens bevarande. De dimensionslösa grupperna beskriver olika fysikaliska fenomen och genom att hålla en grupp konstant när ett experiment utförs i en mindre skala kan vissa förhållanden bevaras (Quintiere, 2006). Genom att exempelvis hålla Froudes tal konstant kan förhållandet mellan tröghetskrafter och lyftkrafter hållas konstanta, vilket är viktigt vid flöden som drivs av naturlig konvektion (Tilley, et al., 2013).

Skalade experiment kan se ut på många sätt där det kanske vanligaste är ett rum som helt enkelt byggts upp i en mindre storlek vartefter brandstorlek o.s.v. har anpassats. Det går även att ha med sprinkler i de skalade modellerna vars flöde och så vidare då också måste skalas (Quintiere, 2012). Det förekommer även så kallad analog skalmodellering där två fluider som har olika densitet används för att efterlikna rörelsen hos brandgas. Exempelvis kan färgat saltvatten ledas in i en tank (modell) med sötvatten (Quintiere, 2006).

I tabell 1 presenteras ett antal dimensionslösa grupper som kan användas inom brandtekniken, dessa är hämtade från Quintiere (2006) där också fler dimensionslösa grupper går att hitta.

Tabell 1. Sammanställning av några vanliga dimensionslösa grupper, från Quintiere (2006).

Variabel/grupp	Dimensionslöst samband	Skalning/kommentar
Hastighet	$\hat{u} = u/\sqrt{g \cdot l}$	Froudetalet (Fr) $u \sim l^{1/2}$
Temperatur	$\hat{T} = \frac{T}{T_\infty}$	$T \sim l^0$
Tryck	$\hat{p} = \frac{p}{\rho_\infty \cdot g \cdot l}$	$p \sim l$
Koncentrationer	$\frac{Y_i}{Y_{i,\infty}}$	$Y_i \sim l^0$
Koordinater (x,y,z)	$\frac{x_i}{l}$	$x_i \sim l$
Tid	$\frac{t}{\sqrt{l/g}}$	$t \sim l^{1/2}$
$\Pi_1 \left( \frac{\text{Tröghetskrafter}}{\text{Viskösa krafter}} \right), Re$	$Re = \frac{\rho_\infty \cdot \sqrt{g} \cdot l^{3/2}}{\mu}$	Ignoreras vanligtvis
$\Pi_2 \left( \frac{\text{Brandkraft}}{\text{Entalpi}} \right), Q^*$	$\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g} \cdot l^{5/2}}$	Viktig att bevara $\dot{Q} \sim l^{5/2}$
$\Pi_3 \left( \frac{\text{Strålningsemission}}{\text{Ideal emission}} \right)$	$\kappa \cdot l$	$\kappa \sim l^{-1}$
$\Pi_4 \left( \frac{\text{Strålningsförluster}}{\text{Brandkraft}} \right), X_r$	$X_r = \frac{\dot{q}_r}{\dot{Q}}$	$X_r \sim l^0$
$\Pi_5 \left( \frac{\text{Ledning}}{\text{Entalpi}} \right), Q_k^*$	$\frac{(k \cdot \rho \cdot c)_w^{1/2}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot g^{1/4} \cdot l^{3/4}}$	Ledning viktig $k_w \sim \rho_w \sim l^{3/2}$
$\Pi_6 \left( \frac{\text{Konvektion}}{\text{Entalpi}} \right), Q_c^*$	$\frac{h_c}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot \sqrt{g \cdot l}}$	Konvektion viktig $h_c \sim l^{1/2}$
$\Pi_7 \left( \frac{\text{Strålning}}{\text{Entalpi}} \right), Q_r^*$	$\frac{\sigma \cdot T_\infty^3}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot \sqrt{g \cdot l}}$	Inkonsekvent med övriga $T_\infty \sim l^{1/6}$
$\Pi_8 \left( \frac{\text{Tjocklek}}{\text{Termisk längd}} \right)$	$\left( \frac{\rho \cdot c}{k} \right)_w^{1/2} \cdot \left( \frac{g}{l} \right)^{1/4} \cdot \delta_w$	$\delta_w \sim l^{1/4}$

Listan med dimensionslösa grupper i tabell 1 är inte på något sätt fullständig men de som finns med i tabellen är de som är mest aktuella för skalningen som rapporten behandlar och några till. Ytterligare grupper som exempelvis behandlar vattendroppstorlek vilket är viktigt när en sprinkler används går att hitta (Quintiere, 2006).

## 2.2 Computational Fluid Dynamics, CFD

Med en CFD-modell menas datoriserade lösningsmetoder av förenklade versioner av Navier Stokes ekvationer för flödesdynamiska beräkningar. Geometrin av intresse delas in ett stort antal mindre kontrollvolymner och ekvationerna löses i var och en av dessa kontrollvolymner. Förutom ekvationerna som beskriver fluidens flöde kommer en CFD modell som används i brandsammanhang även att behöva kunna lösa ekvationer som har att göra med förbränning, strålning, turbulens på en mindre skala än kontrollvolymnerna och så vidare.

Det går att använda sig av flera olika ansatser för att genomföra de nödvändiga beräkningarna. I praktiken används RANS-modeller (Reynolds Averaged Navier Stokes) eller LES-modeller (Large Eddy Simulation), men i teorin kan även DNS (Direct Numerical Simulation) användas där cellerna är tillräckligt små. För RANS-modeller så beräknas Navier Stokes ekvationer på ett sätt som bildar tidsmedelvärden och jämnar ut turbulensen. Det går att använda sig av stora tidssteg och kontrollvolymner men lösningarna itereras fram över hela beräkningsvolymen. I LES-

modeller löses istället ekvationerna explicit vilket innebär att beräkningarna ständigt rör sig framåt i tiden (resultatet i ett föregående tidssteg används för att direkt räkna fram ett svar i nästa). Tidsstegets storlek bestäms av cellernas storlek där tidssteget inte kan bli mindre än tiden det tar för den snabbaste partikeln att ta sig igenom en cell. Turbulenta rörelser som är i samma storlek som cellerna och större kan beräknas direkt i griden medan de rörelser som är mindre än griden får beräknas med en undermodell (Frantzich & Nystedt, 2011).

### 2.2.1 FDS

FDS är en CFD-modell som är anpassad för branddrivna flöden (Navier-Stokes ekvationer har anpassats för flöden med låg hastighet som är termiskt drivna). Det är en LES-modell där möjligheten att gå över till DNS finns då griden är tillräckligt fin (McGrattan, et al., 2014).

Förbränningen i FDS kan i det enklaste fallet modelleras genom att ämnen klumpas ihop till kategorierna ”Luft”, ”Bränsle” och ”Produkter” och då rätt komposition av de olika kategorierna förekommer i en cell sker reaktionen. Blandningen av ämnen styr alltså när en reaktion kan ske vilket den då också gör ögonblickligen, ”mixed is burned” (McGrattan, et al., 2014).

Strålningen beräknas på samma grid som flödesberäkningarna och sker via en så kallad Finit Volym Metod (FVM). Strålningen antas i normalfallet ske från en grå gas men det går i vissa fall även att använda en ”wide band model”. Vattendroppar kan både absorbera och bryta strålning, olika gaser och sot kan dock inte bryta strålningen. Standardinställningen är att det från varje cell sänds ut ungefär 100 diskreta strålningsvinklar vilket dock kan ökas av användaren i utbyte mot att beräkningstiden ökar. I vanliga fall tar strålningsberäkningarna upp ungefär 20 % av beräkningskapaciteten (McGrattan, et al., 2014).

Geometrier byggs upp på ett tredimensionellt rätlinjigt rutnät som definieras av användaren. För att kunna genomföra simuleringar behöver användaren definiera förekommande material och dess egenskaper, branden för det aktuella problemet samt vilken mätdata som ska samlas in (McGrattan, et al., 2014).

Kvaliteten på resultaten som går att få ut beror till stor del på hur fina celler som används vid simuleringen. Ett sätt att uppskatta kvaliteten är att beräkna upplösningen för brandplymen med kvoten  $D^*/dx$ , där  $dx$  är cellens storlek och  $D^*$  beräknas enligt ekvation 1 (McGrattan, et al., 2014).

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Ekvation 1}$$

I (U.S. Nuclear Regulator Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES). Electric Power Research Institute (EPRI), 2007) anges att  $D^*/dx=5-10$  kan ge gynnsamma resultat till en rimlig beräkningskostnad. Även om plymens upplösning beräknas är det nödvändigt att utföra en gridkänslighetsanalys där cellerna förfinas så att det går att se ifall resultaten förändras, gör de inte det kan resultaten sägas vara gridoberoende. Enligt Frantzich och Nystedt (2011) kan resultaten anses vara tillräckligt goda då förändringen som sker för de resultat som är intressanta är mindre än 10 % vid en halvering av cellstorleken.

Med en tillräcklig upplösning och då en brand definieras av användaren så beräknar FDS flödeshastigheter och temperaturer med en träffsäkerhet på 10-20 % jämfört med experimentellt genomförda mätningar (McGrattan, et al., 2014).

### 2.3 Osäkerhet vid experimentella försök

Genom att behandla osäkerheten vid experimentella mätningar så anges ett område inom vilket det sanna värdet påstås finnas. Osäkerheten kan ha olika källor och vid experiment kan det vara

mätosäkerheter och osäkerheter i indata som är två olika källor. Dessa kan kombineras till en kombinerad osäkerhet,  $u_c$  (Johansson, 2013).

Johansson (2013) sammanfattar vilken osäkerhet som går att förvänta sig vid experimentella mätningar av effektutveckling och temperaturer från en mängd andra källor. När effektutvecklingen mäts med en syrgaskalorimeter anges osäkerheter från  $\pm 7\%$  till  $\pm 20\%$  där de flesta ligger kring  $\pm 10\%$ .

Osäkerheter för temperaturmätningarna avser mätningar med termoelement i brandtekniska experiment. Det finns en skillnad i osäkerhet beroende på ifall temperaturmätningarna sker i det övre varma brandgaslagret eller i den nedre delen av ett rum där strålningseffekter är viktiga. Skillnaden i felet kan vara så stor som  $7\%$  i det övre brandgaslagret mot  $75\%$  i den lägre delen av rummet. Andra siffror som anges är en osäkerhet på  $10\%$  för temperaturmätningar vid en experimentserie, men där det finns en variation i osäkerheten på  $\pm 5 - 33\%$  av temperaturökningen beroende på var mätningarna är utförda.

För den experimentserie som den här rapporten utgår ifrån anger Johansson et al. (2014) en kombinerad osäkerhet för temperaturmätningarna i det varma brandgaslagret på  $12\%$ .

## 2.4 Funktionalanalys

Funktionalanalys kommer användas för att kvantitativt kunna jämföra resultat från simuleringar och småskaliga försök. Peacock et al. (1999) har presenterat hur analysmetoden kan användas inom brandtekniken och bland annat Johansson et al. (2014) har tidigare använt sig av den.

Utgångspunkten är att två dataserier presenterade som grafiska kurvor behandlas som vektorer,  $\mathbf{X}_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , för att kunna jämföras. Det går då att bestämma vektorernas längder samt avstånd från varandra och vinklar mellan dem. På så sätt kan en kvantitativ jämförelse utföras. Peacock et al. (1999) föreslår tre mått som också kommer att användas.

Det första måttet är den Euklidiska relativa skillnaden (ERS). ERS mäter hur stor den genomsnittliga skillnaden är mellan två dataserier. Ett värde på  $0,1$  skulle innebära en skillnad på  $10\%$  och när den relativa skillnaden närmar sig noll så innebär det att kurvornas magnituder är identiska. ERS beräknas med ekvation 2.

$$ERS = \frac{\|\mathbf{E} - \mathbf{m}\|}{\|\mathbf{E}\|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i)^2}} \quad \text{Ekvation 2}$$

Det andra måttet är den Euklidiska projektkoefficienten (EPK). Med EPK menas det talet som om det multipliceras med  $\mathbf{m}$  leder till minsta möjliga skillnad i magnitud mellan de två dataserierna  $\mathbf{m}$  och  $\mathbf{E}$ . Ett värde på  $1$  innebär att skillnaden mellan kurvorna är så liten som möjligt. Ett värde större än  $1$  innebär att värdena som modellen ( $\mathbf{m}$ ) tar fram är mindre än de experimentellt framtagna. EPK beräknas med ekvation 3.

$$EPK = \frac{\langle \mathbf{m}, \mathbf{E} \rangle}{\|\mathbf{m}\|^2} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^n m_i^2} \quad \text{Ekvation 3}$$

Det sista måttet är Secant cosinus (SC). Det är ett mått på hur väl kurvornas former liknar varandra. När värdet på SC närmar sig  $1$  så är det enda som skiljer vektorerna åt en konstant faktor, kurvornas magnitud kan alltså fortfarande skilja dem åt. SC beräknas med ekvation 4.

$$SC = \frac{\langle \mathbf{E}, \mathbf{m} \rangle}{\|\mathbf{E}\| \cdot \|\mathbf{m}\|} = \frac{\sum_{i=s+1}^n \frac{(E_i - E_{i-s}) \cdot (m_i - m_{i-s})}{s^2 \cdot (t_i - t_{i-1})}}{\sqrt{\sum_{i=s+1}^n \frac{(E_i - E_{i-s})^2}{s^2 \cdot (t_i - t_{i-1})} \cdot \sum_{i=s+1}^n \frac{(m_i - m_{i-s})^2}{s^2 \cdot (t_i - t_{i-1})}}} \quad \text{Ekvation 4}$$



I ekvation 4 används  $s$  för att filtrera bort störningar i mätningarna och få en slät kurva. Det är viktigt för att det som jämförs mellan kurvorna inte ska vara små tillfälliga fluktuationer utan kurvans stora rörelser. Används ett för stort värde på  $s$  förloras istället den naturliga variationen i dataserien. I praktiken är  $s$  antalet mätpunkter som utjämningen görs över och i den här rapporten används ett värde på 40 (motsvarande 200 s i tiden för skala 1:4). Motiveringen till att använda ett så pass högt värde är att i många av kurvorna sker mycket små förändringar över tid och de tillfälliga fluktuationerna är ofta av ungefär samma storlek som de förändringar som sker över tiden 200 s. Vad medelvärdesbildning över olika tider innebär för kurvorna i rapporten redovisas i bilaga 2.

Funktionalanalysen används över tiden 300 – 900 s för att jämföra resultat från försöken med simuleringar i skala 1:4 och över tiden 600 – 1800 s för att jämföra simuleringar i fullskala med simuleringar i skala 1:4. Det är samma datapunkter som används för simuleringarna i skala 1:4, men tiden anges i fullskaletid i det andra fallet. Då funktionalanalysen används bedöms brandförloppen ha stabiliserats något.



### 3 Exempel på användning av skalning

På grund av den stora mängden dimensionslösa grupper är det inte helt uppenbart hur ett experiment ska skalas i praktiken. Möjligtvis uppenbart ska själva modellen först skalas geometriskt där exempelvis en takhöjd på 2 m minskas till 1 m om skalan är 1:2. Inom brandtekniken skalas därefter hastigheter oftast enligt froudetalet efter vilket modelleringstekniken också har fått sitt namn, froudemodellering. Skalningen sker därmed inte efter Reynolds tal ( $Re$ ), men flödet måste fortfarande vara turbulent vilket även innebär att  $Re$  inte får vara för litet ( $Re < 10^5$ ). Att behålla ett turbulent flöde innebär därmed också att modellen inte kan vara hur liten som helst (Quintiere, 2006). Quintiere (2012) anger att 0,3 m i takhöjd generellt sätt är ett minimum för att behålla ett turbulent flöde. Tilley et al. (2013) presenterar resultat från CFD-simuleringar i olika skalor där syftet är att undersöka ifall det är befogat att skala upp resultat som inhämtats i skalade försök. De drar slutsatsen att om endast froudetalet bevaras måste modellerna visa välutvecklad turbulens för att likhet mellan skalorna ska finnas. Ifall flödet blir svagt turbulent försvinner denna likhet och fler dimensionslösa grupper behöver bevaras (Reynolds och/eller Rayleightalet).

För att kunna utföra mätningar av temperaturer, hastigheter och koncentrationer av ämnen är  $Q^*$  ( $\Pi_2$ ) den viktigaste gruppen att bevara. Mätningar i skalmodeller relateras till hur det skulle se ut i fullskala genom att se till den specifika variabeln vid en viss dimensionslös position och tid (se tabell 1). Samma bränsle behöver användas i den skalade modellen som i fullskala för att kunna relatera mätningar av ämneskoncentrationer mellan skalorna (Quintiere, 2012). Exempelvis temperaturen går att direkt relatera till vad den är i fullskala medan hasigheten som även nämns tidigare måste skalas om enligt froudetalet.

Efter  $Q^*$  är grupperna  $\Pi_5 - \Pi_8$  som har att göra med värmeförlusterna från modellen viktiga att försöka ta hänsyn till men det kan vara svårt att bevara alla grupper (Quintiere, 2012). För att skala värmeledningen genom väggar kan materialet och dess tjocklek ändras, se  $\Pi_5$  och  $\Pi_8$ . Konvektionen kan skalas genom att värmeövergångstalet  $h_c$  ändras, se  $\Pi_7$ . För att göra det skulle material som strömning sker över att kunna bytas ut, men i praktiken kan det vara svårt att hitta material som passar in på dessa krav. För att skala strålningen behöver dels brandgasernas emissivitet,  $\Pi_3$  förändras, vilket innebär att bränslet behöver ändras och så måste den omgivande temperaturen förändras,  $\Pi_7$ . Ifall omgivande temperatur i fullskala är 20 °C skulle den skalade temperaturen i skala 1:4 vara -40 °C vilket dels är opraktiskt och dels kommer kunna inverka på hur andra grupper kan skalas (Wang, et al., 2008). Oavsett svårigheter att genomföra skalningar så poängteras ofta vikten av att avgöra lämpligheten och effekten av att utelämna skalningen av vissa grupper för en bestämd försöksuppställning (Quintiere, 2006; Quintiere, 2012; Wang, et al., 2008). Angående grupperna som är kopplade till värmeförluster så anger Wang et al. (2008) att när värmeledningen skalas men konvektionen och strålningen har utelämnats stämmer temperaturprofiler ändå väl överens mellan olika skalor. Även Hertzberg och Li (2013) drar slutsatsen att det är viktigt att ta hänsyn till skalningen av värmeledningen. Att det stämmer i det allmänna fallet skulle bero på att ytan som tas upp av öppningar ut från rum oftast är liten i förhållande till storleken på övriga ytor och att värmeförlusterna genom väggarna har en stor påverkan på energibalansen.

#### 3.1 Avvikelser orsakade av skalning

Det har gjorts flera olika försök att avgöra hur pass överensstämmande resultat för exempelvis temperaturmätningar är mellan olika skalor. De olika försöken kan ha genomförts på lite olika sätt och vad de har kommit fram till kommer därför presenteras separat för varje försök.

Quintiere et al. (1978) har utfört försök i skala 1:7 för en försöksuppställning som tidigare genomförts i fullskala och jämfört resultaten. Exakt samma dimensionslösa grupper som i tabell 1 används inte, men hänsyn tas ändå till både effektutvecklingen och värmeförlusterna från

modellen. Temperatur och hastighetsmätningar anses överensstämma bra mellan 1:7 och fullskalan. I figurer som presenteras över temperaturmätningar vid olika positioner syns det, men i vissa fall kan det skilja 50-100 °C mellan de olika skalorna. De största skillnaderna har uppstått vid mätningarna nära taket. Det konstateras också att strålningen inte lyckas skalas och att uppmätta strålningsnivåer inte är överensstämmande mellan 1:7 och fullskala. De anger dock att resultaten kan förbättras analytiskt eller genom att öka modellens storlek.

Försök med modeller i skala 1:4 och 1:8 genomförs av Wang et al. (2008) där temperaturer jämförs skalorna emellan. Modellerna har vad som anses vara små öppningar utåt och strålningen ignoreras vid skalningen medan värmeledning i väggarna tas hänsyn till. Deras resultat visar på att i fall där öppningarna kan anses vara små så överensstämmer temperaturprofiler mellan skalorna bra. Då flammorna inte slår ut från öppningen (mindre effekt) är skillnaden mellan maxtemperaturer i skalorna mindre än 10 % och då flammor slår ut ur öppningar (större effekt) är skillnaden fortfarande mindre än 20 %. Att deras slutsatser bygger på att öppningarna är små beror på att strålningen inte har skalats och desto större öppningarna är från utrymmet desto större del av värmeförlusterna kommer ske via strålning.

Chow och Henry (2008) utvärderar skalningsregler som föreslås i annan litteratur (främst används  $Q^*$ ) genom att utföra experiment i skala 1:26,5 och jämföra resultat från dessa försök med tidigare resultat från fullskaleförsök. Sammanfattningsvis resulterar rapporten i slutsatserna att skalningsreglerna för effektutveckling och tid anses vara användbara för att beskriva rökfyllnadsprocessen medan skalningsregeln för temperatur bör ses över. De temperaturökningar som mäts upp i de skalade försöken är som högst kring 50 °C medan de inte var mer än 20 °C vid fullskaleförsöken. Värt att notera är att värmeförluster inte skalas. Då modellen är relativt kraftigt skalad innebär det också en kraftig sänkning av brandeffekten som används och den högsta effekt som användes i fullskala (1,8 MW) motsvarar 500 W i den skalade modellen. Ingen diskussion huruvida det påverkar turbulensen och flödesförhållandena i modellen förekommer.

Modeller i skala 1:1, 1:2 och 1:3,5 byggs upp och flera olika mätdata så som gastemperaturer, hastigheter, ämneskoncentrationer, temperaturer inne i väggar och värmeflöden jämförs av Hertzberg och Li (2013). Både effektutveckling och värmeförluster tas hänsyn till i skalningen. Uppmätta temperaturer stämmer överlag bra överens skalorna emellan. I till exempel en dörröppning underskattas temperaturer något i de mindre skalorna, samma sak går även att se för det övre brandgaslagret. Hastigheter stämmer mycket bra överens från skala till skala och samma sak gäller för ämneskoncentrationer även om både syre- och koldioxidkoncentration överskattas något vid större brandeffekter. Temperaturer som mäts upp inne i väggarna skalas också bra. Även värmeflöde skalar bra, dock går det att se en del skillnader i de figurer som presenteras, främst mellan skala 1:1 och 1:3,5. För att få en bättre uppfattning om hur stora skillnaderna är för temperaturmätningarna gjordes egna beräkningar utifrån Hertzbergs och Lis (2013) figurer och tabeller. Skillnaden mellan resultaten i fullskala och skala 1:2 för de två högst belägna termoelementen är små, kring 5 % vid de två första nivåerna för effektutvecklingen. Skillnaden är något större vid den högsta effektutvecklingen där skillnaden är upp mot 10 %. Mellan fullskala och skala 1:3,5 skiljer resultaten något mer. Vid den lägsta effektutvecklingen skiljer det ca 5 % och vid de både högre effektutvecklingarna skiljer det 10 – 20 %. Vid den lägre effekten är det temperaturerna i fullskalan som är något lägre än för de mindre modellerna och vid de högre effekterna är förhållandet omvänt. Uppskattningarna gjordes för scenariot där deras brännare är placerad i ett hörn och från termoelementstrådet som är placerat i rummets mitt.

Ingasson och Li (2010) genomför försök med bränder i tunnlar i skala 1:23. Inga försök i andra skalor genomförs. Resultaten jämförs dock med resultat från fullskaleförsök där förutsättningarna har liknat de under deras egna försök. De har då jämfört hur temperaturen i takhöjd förändras i tunnelns längdriktning. Temperaturen har normaliserats genom relatera temperaturökningen

Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

vid en viss position till den maximala temperaturökningen för det testet och avståndet from branden har normaliserats med hjälp av tunnelns takhöjd. Från deras jämförelse går det inte att utläsa hur stort felet är för temperaturmätningar i den skalade modellen jämfört med temperaturmätningar i fullskala. Däremot går det att se att temperaturdistributionen i tunnelns längdriktning i stor utsträckning liknar temperaturdistributionen från flera fullskaletest. De drar slutsatsen att temperaturdistributionen kan modelleras väl även i skala 1:23. En egen notering är att temperaturerna för deras skalade försök verkar ligga något lågt jämfört med fullskaleförsöken.



## 4 Försöksuppställning

Informationen om försöksuppställningen samt figurer är hämtade från Johansson et al. (2014), med undantag för det foto som finns med vilket är taget av rapportförfattaren.

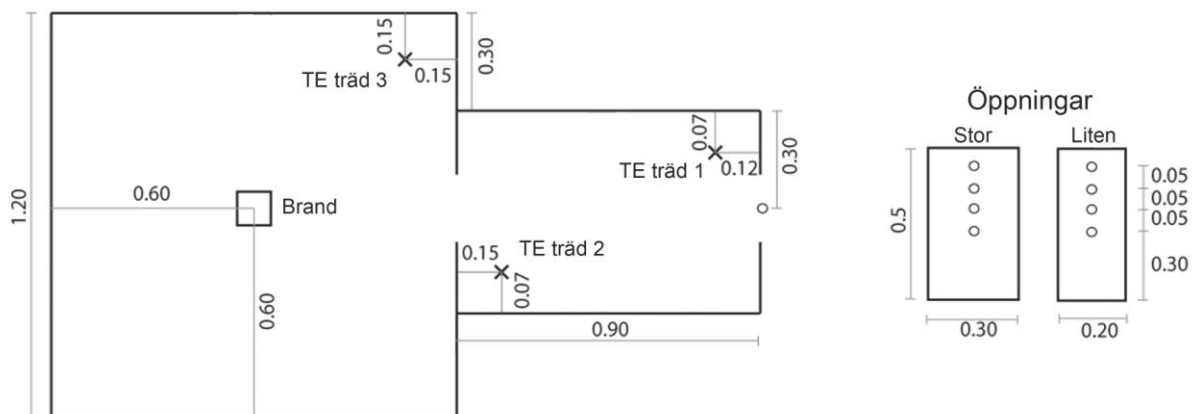
Förenklat så bestod försöken av två sammansatta rum i skala 1:4 med en öppning mellan. I mitten av det ena rummet placerades en brand och från det andra rummet fanns en öppning ut till omgivningen. Vilket rum som var innerst, storleken på öppningarna och branden samt vilket bränsle som användes varierades. Totalt genomfördes 16 variationer. I tabell 2 visas mått på de förekommande geometrierna.

Tabell 2. I tabellen redovisas mått på rum och öppningar som används i experimenten.

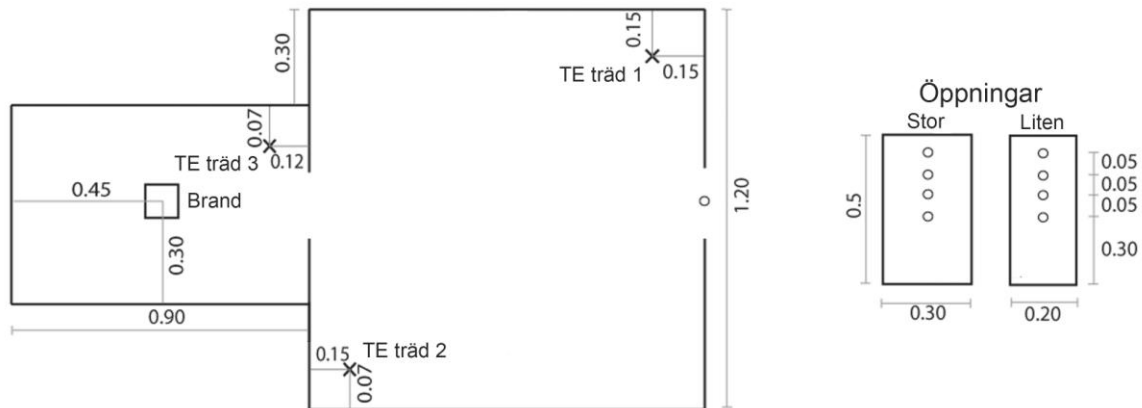
	Rum		Öppningar	
	Litet	Stort	Liten	Stor
Bredd (m)	0.6	1.2	0.2	0.3
Längd (m)	0.9	1.2	-	-
Höjd (m)	0.6	0.8	0.5	0.5

Bränslena som användes var heptan och metan. För heptan användes ett litet cirkulärt bål ( $d=0.15$  m) och ett stort cirkulärt bål ( $d=0.2$  m). För metan användes en  $0,1 \times 0,1$  m gasbrännare där gasflödet reglerades för att få en mindre och en större konstant effektutveckling på 10 respektive 20 kW.

I alla försöken gjordes mätningar av temperaturer, gasflöden och effektutveckling. I figur 2 och 3 visas positionerna för mätningarna som är relevanta för den här rapporten. De höjder som termoelementen i termoelementstråden sitter på går att hitta i Bilaga 3.



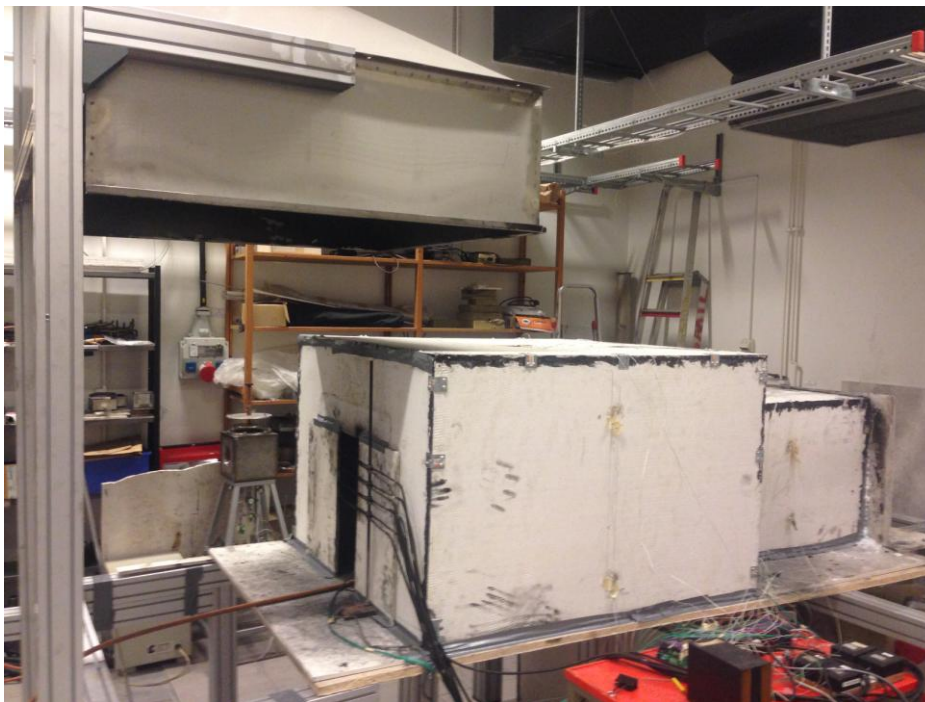
Figur 2. I figuren visas positioner för mätningar då det större rummet är innerst. Kryss markerar termoelementstråd och ringar markerar hastighetsmätningar. Omritad efter (Johansson, et al., 2014).



Figur 3. I figuren visas positioner för mätningar då det mindre rummet är innerst. Kryss markerar termoelementstråd och ringar markerar hastighetsmätningar. Omritad efter (Johansson, et al., 2014).

Utöver de mätningar som syns i figur 2 och 3 mättes även lufttemperaturen någon meter från modellens ena sida och effektutvecklingen mättes med hjälp av en syrgaskalorimeter.

Tak och väggar i modellen är uppbyggda av Promatect-H med tjockleken 12 mm och dess materialegenskaper finns beskrivna i Bilaga 3. I figur 4 visas hur det såg ut då ett av försöken genomfördes.



Figur 4. En bild från genomförandet av ett av försöken där det lilla rummet var innerst och det stora ytterst.

#### 4.1 Scenarier som behandlas i rapporten

För att undersöka skalningen har två av de 16 scenarierna valts ut för att studeras vidare och dessa beskrivs här. Scenarierna valdes ut för att de bedömdes vara de lämpligaste att simulera. Detta då effektutvecklingen för de båda valda scenarierna var jämn och hög jämfört med många av de andra scenarierna. En lägre effektutveckling hade inneburit att finare celler hade behövt användas och då effektutvecklingen förändras kraftigt över tiden (som då heptanbålen användes)



Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

hade den blivit svårare att efterlikna. I den här rapporten kommer de valda scenarierna att benämnas som scenario 1 och 2.

I scenario 1 är det lilla rummet innerst och det stora ytterst. Både öppningen mellan rummen och den ut från det yttre rummet är ”liten” (se tabell 2). Metan används som bränsle och den uppmätta effektutvecklingen är på ca 20 kW. Temperaturen i rummen ligger på 22 °C då försöket startar.

I scenario 2 är det stora rummet innerst och det lilla ytterst. Öppningen mellan rummen är ”liten” och öppningen ut från det yttre rummet är ”stor” (se tabell 2). Metan används som bränsle och den uppmätta effektutvecklingen ökar från ungefär 19 kW vid försökets början till ungefär 21 kW då 20 minuter har gått. Temperaturen i rummen ligger på 25 °C då försöket startar.



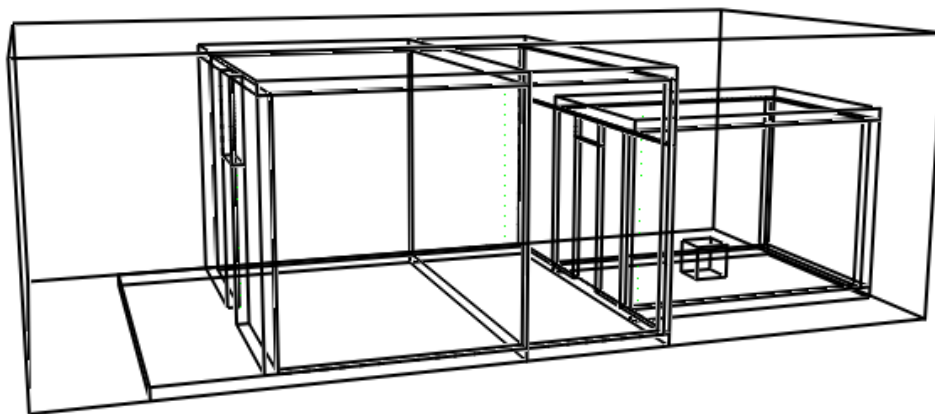
## 5 Simuleringar

Simuleringar utförs dels i samma skala som försöken som beskrivs i föregående avsnitt, 1:4. Därefter utförs simuleringarna i skala 1:1. För både simuleringar i skala 1:4 och 1:1 genomförs en känslighetsanalys. Dels undersöks gridberoende och dels undersöks påverkan av osäkra indata. Alla simuleringar utförs i FDS 6.1.1 (McGrattan, et al., 2014).

För båda scenarierna körs en första simulering där  $D^*/dx=5$ . Ytterligare en simulering genomförs därefter där kvoten ökas till 10. Dessa kvoter ska enligt avsnitt 2.2.1 medföra en tillräckligt god upplösning. För simuleringarna i skala 1:4 motsvarar detta cellstorlekar på 0,04 respektive 0,02 m. För skala 1:1 motsvarar det cellstorlekar på 0,16 m respektive 0,08 m.

Då försöken genomfördes så mätts temperaturer på olika höjder i båda rummen och gasflödets hastighet mätts i den yttre öppningen (se figur 2 och 3), dessa mätningar görs även i simuleringarna. Utöver det samlas ytterligare information in i form av så kallade *slicefiles* och *boundaryfiles* som kan användas för att visualisera exempelvis temperaturer i en genomskärning av rummet eller strålningen mot en viss yta.

I figur 5 visas ett exempel på en simuleringsgeometri upp, den kommer från simuleringarna för scenario 1 i skala 1:4.



Figur 5. I figuren visas konturerna för geometrin då scenario 1 simulerades i skala 1:4. Konturerna som går runt mitten av det yttre rummet markerar var gränsen mellan de två mesherna som användes går.

Exempel på en indatafil för skala 1:4 och en för fullskala presenteras i bilaga 4.

### 5.1 Materialparametrar och effektutveckling

Simuleringarna utförs först i skala 1:4 och därefter i skala 1:1. Effektutveckling och materialparametrar skalas upp med hjälp av skalningsregler från avsnitt 2.1. I tabell 3 anges dessa parametrar för båda skalorna och vilket samband som används för att genomföra skalningen. Med skalningsfaktor menas skillnaden i storlek för den specifika parametern mellan skalorna. I bilaga 5 går att se hur beräkningarna med de dimensionslösa sambanden genomförs.

**Tabell 3. I tabellen anges indata som förändras med hjälp av skalningssambanden och därför är olika i simuleringarna i fullskala och skala 1:4. Materialet som avses i materialdata är Promatect H.**

Parameter	Skalningssamband	Skalningsfaktor	Skala 1:4	Skala 1:1
Effektutveckling, $\dot{Q}$ (kW)	$\Pi_2$	32	20*	640*
Värmeupptagningsförmåga $k \cdot \rho \cdot c$ (W <sup>2</sup> s/m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> )	$\Pi_5$	8	140070	1120560
Värmeledningsförmåga $k$ (W/mK)			0,175 (Promat Nordic, 2006)	0,834
Densitet $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )			870 (Promat Nordic, 2006)	1600
Värmekapacitet $c$ (J/kgK)			920 (Promat Czech Republic, 2014)	840
Materialtjocklek, $\delta_w$ (m)	$\Pi_8$	2,38	0,012	0,029

\*För scenario 2 ökade effekten från 19 till 21 kW i skala 1:4 vilket motsvarade en ökning från 608 till 672 kW i fullskala.

Utöver de skalningssamband som används i tabell 3 så används också skalningssambanden som listas innan  $\Pi$ -grupperna i avsnitt 2.1. Skalsambandet för tiden anger att simuleringarna behöver köras under dubbelt så lång tid i skala 1:1 jämfört med i skala 1:4. Simuleringarna i skala 1:4 körs därför i 20 minuter medan simuleringarna i skala 1:1 körs i 40 minuter.

I alla simuleringar är bränslet som används metan för vilket en *soot yield* på 0.01 används. En strålningsfraktion på 0.16 används för branden (Guigard, et al., 2000).

## 5.2 Känslighetsanalys

För både simuleringarna i fullskala och skala 1:4 genomförs en känslighetsanalys.

Känslighetsanalysen utförs genom att förändra en (1) variabel åt gången, köra simuleringen igen och jämföra resultatet med grundsimuleringen. När en variabel justeras bedöms förändringen i resultatet se liknande ut för scenario 1 och 2. Av den anledningen görs känslighetsanalysen enbart för ett av scenarierna, scenario 1.

Anledningen till att en känslighetsanalys genomförs är för att kunna få en uppfattning om hur stor inverkan olika val som har gjorts angående indata kommer att ha på resultatet. Variablerna som undersöks i känslighetsanalysen valdes ut av olika anledningar. När försöken utfördes befann sig modellen under en fläkt som inte togs med i de ursprungliga simuleringarna och för att se hur stor inverkan det valet hade på resultaten kördes en simulering med fläkt. I fullskala förändrades dels bränslet för att se om skalningen påverkades av det. Väggegenskaper förändrades också för att vara identiska med de i skala 1:4 för att få en uppfattning vad det innebar att ignorera skalningen av värmeledning. I skala 1:4 förändrades också indata som bedömdes som osäker trots att den hade hämtats i en källa (exempelvis strålningsfraktion och värmekapacitet för Promatect) samt indata som byggde på antaganden (soot yield och Promatect's emissivitet). I tabell 4 listas simuleringarna som körs i känslighetsanalysen.

Tabell 4. I tabellen listas de simuleringar som körs i känslighetsanalysen.

Skala 1:4		
Variabel	Tidigare värde	Förändrat värde
Soot yield (-)	0,01	0,05
Strålningsfraktion (-)	0,16	0,2
Ursprunglig temperatur (°C)	22	27
Promatecs emissivitet (-)	0,9	0,5
$k$ (W/mK)	0.175	0,2
$c$ (J/kgK)	920	1500
Fläkt	-	En fläkt som för bort brandgaser placeras ovanför den yttre öppningen.
Skala 1:1		
Behålla väggegenskaper	-	Oförändrade väggegenskaper från skala 1:4
Byta ut bränslet	Metan	N-heptan



## 6 Resultat

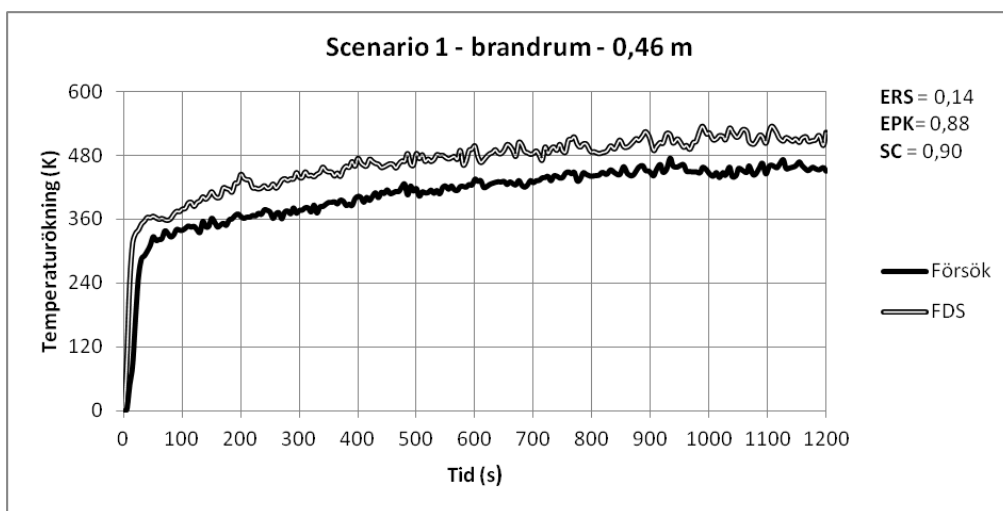
Resultaten presenteras så att jämförelserna som nämns i metoden ska kunna genomföras. Det innebär att jämförelser mellan resultat från försök och simuleringar i skala 1:4 presenteras först och följs av jämförelser mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala. Sist presenteras resultaten av känslighetsanalysen.

### 6.1 Jämförelse mellan försök och simuleringar i skala 1:4

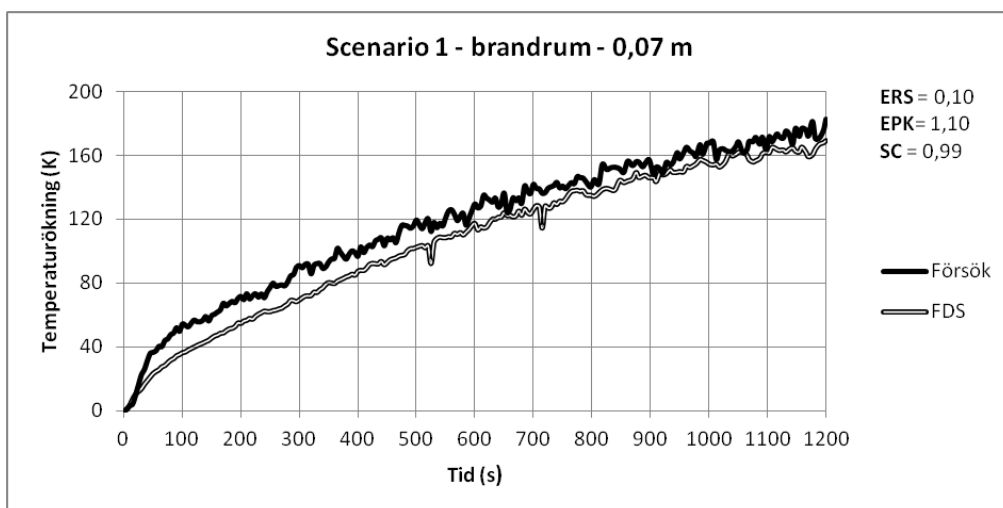
Jämförelser av temperaturer presenteras för fyra punkter för varje scenario. I det stora rummet sker jämförelserna på höjderna 0,63 m och 0,07 m. I det lilla rummet sker jämförelserna på 0,46 m och 0,07 m höjd. I samband med dessa jämförelser presenteras även ERS, EPK och SC, vilka är framtagna då  $t=300-900$  s. Slutligen presenteras också temperaturprofiler vid tidpunkten 600 s.

#### 6.1.1 Scenario 1

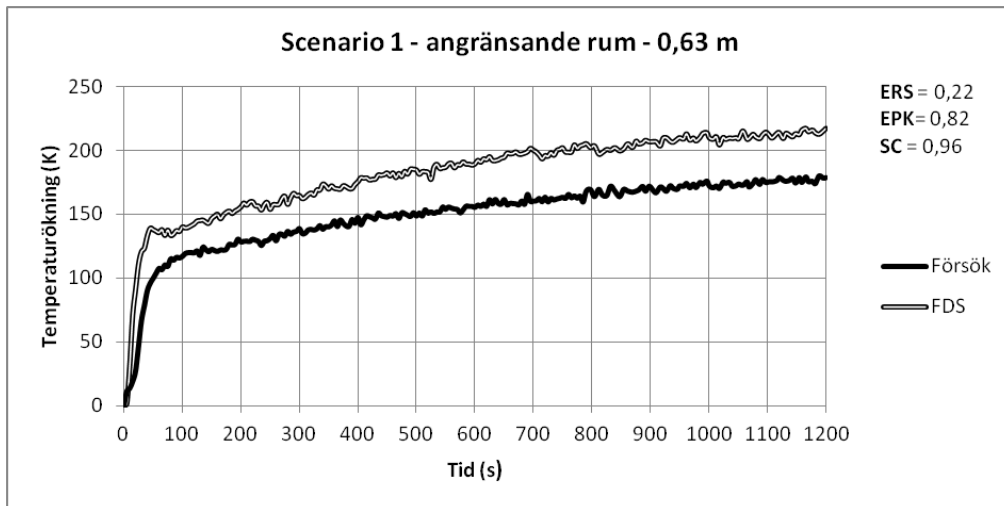
Här presenteras jämförelserna mellan försök och simuleringar för scenario 1. Figur 6 – 9 visar jämförelser vid enskilda mätpunkter och figur 10 – 11 visar temperaturprofiler.



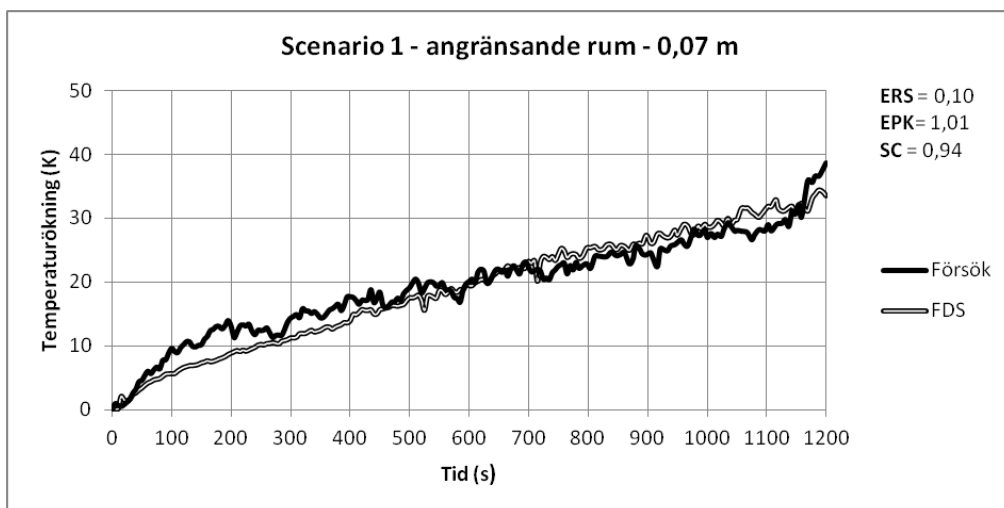
Figur 6. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



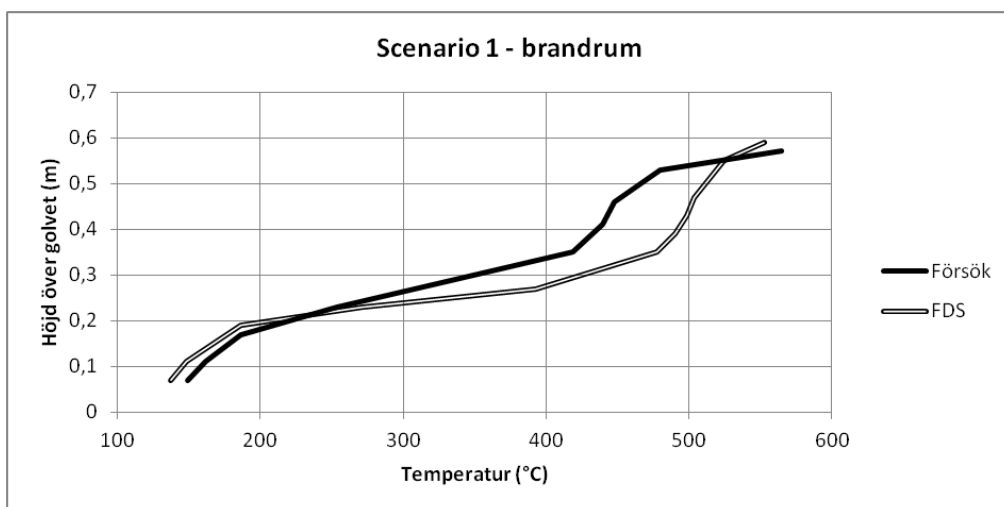
Figur 7. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



Figur 8. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.

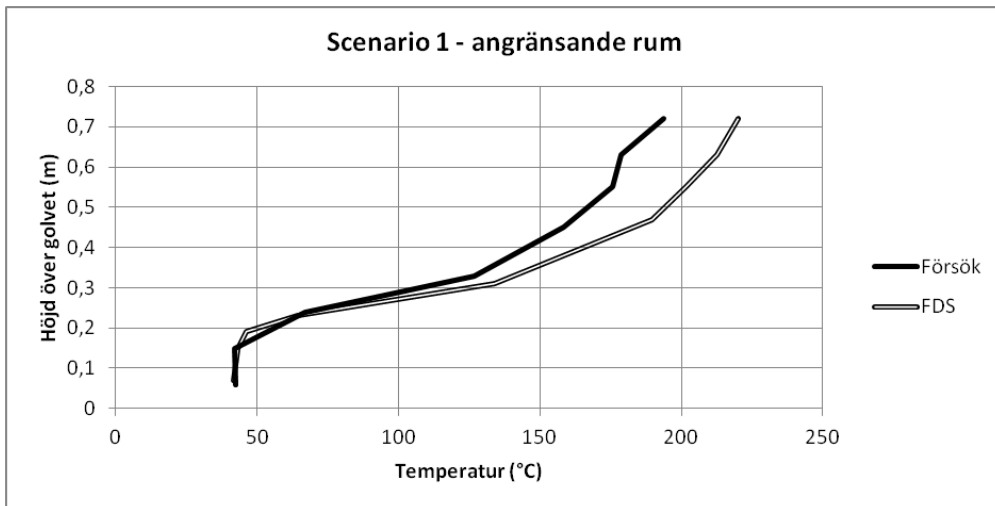


Figur 9. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



Figur 10. Temperaturprofiler från mätningar av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS för scenario 1 i brandrummet. Resultaten har medelvärdesbildats över två minuter kring tiden 600 s.

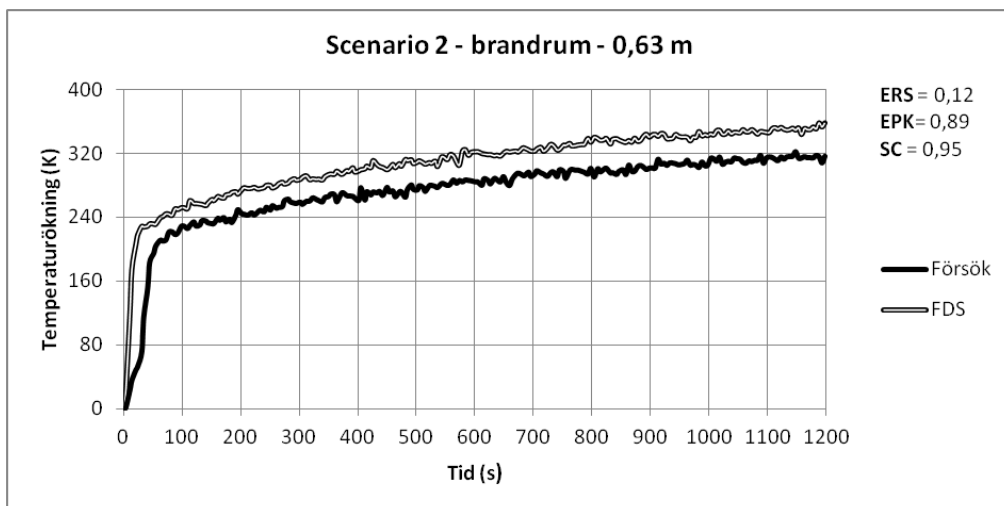




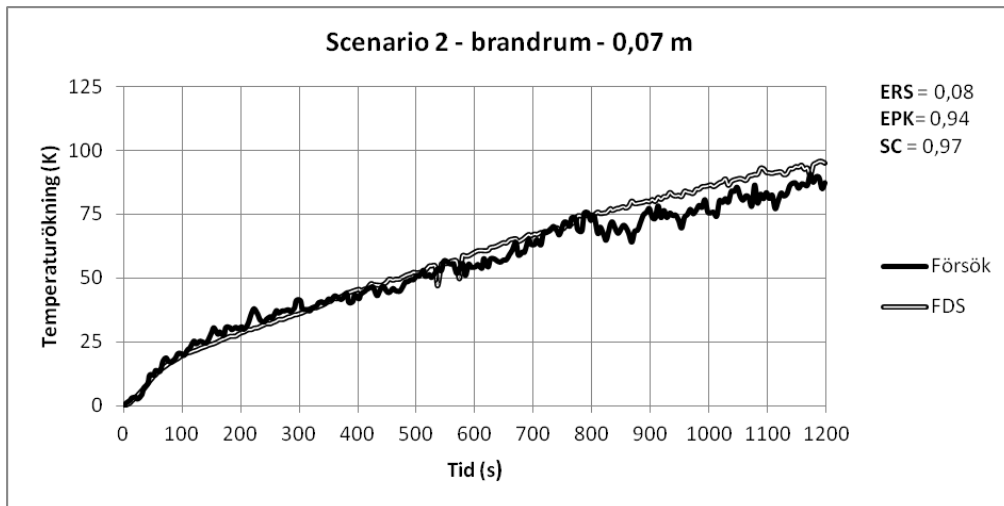
Figur 11. Temperaturprofiler från mätningar av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS för scenario 1 i det angränsande rummet. Resultaten har medelvärdesbildats över två minuter kring tiden 600 s.

### 6.1.2 Scenari 2

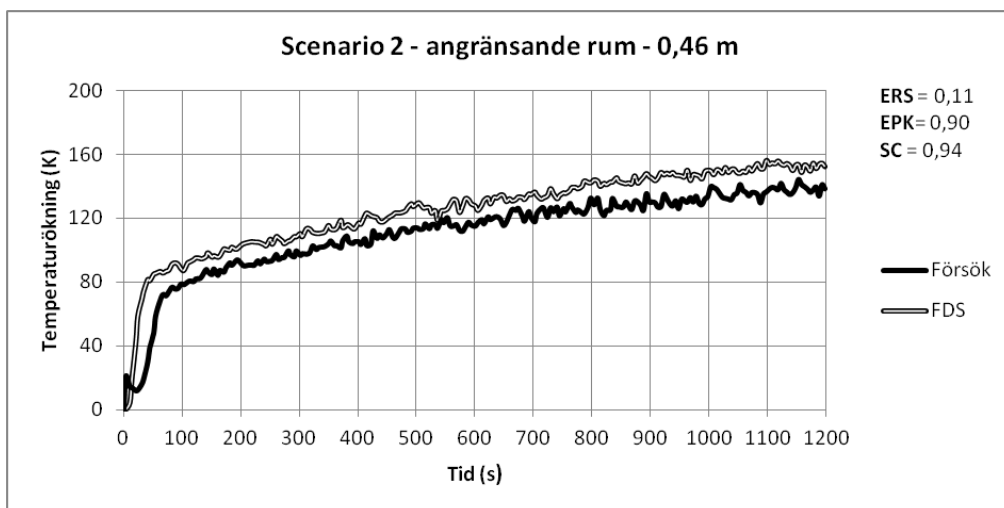
Här presenteras jämförelserna mellan försök och simuleringar för scenario 2. Figur 12 – 15 visar jämförelser vid enskilda mätpunkter och figur 16 – 17 visar temperaturprofiler.



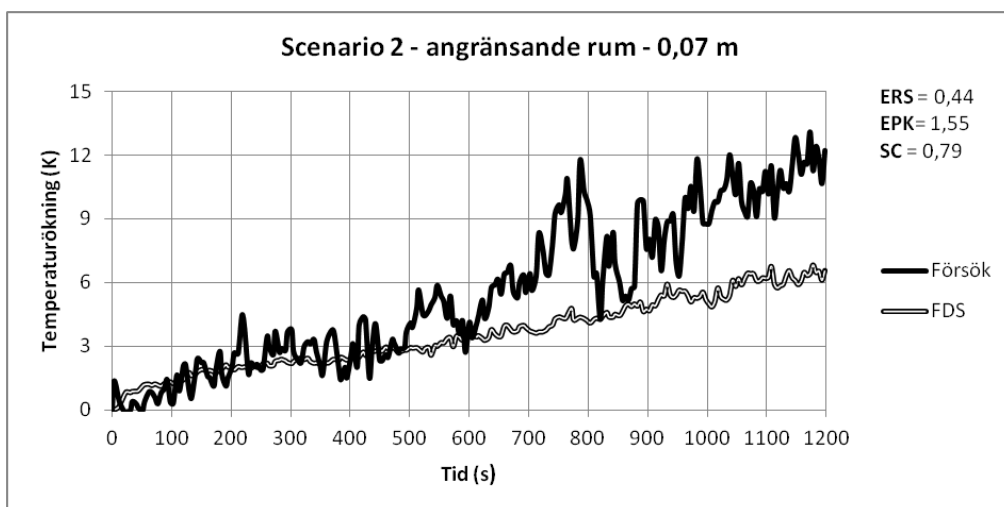
Figur 12. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



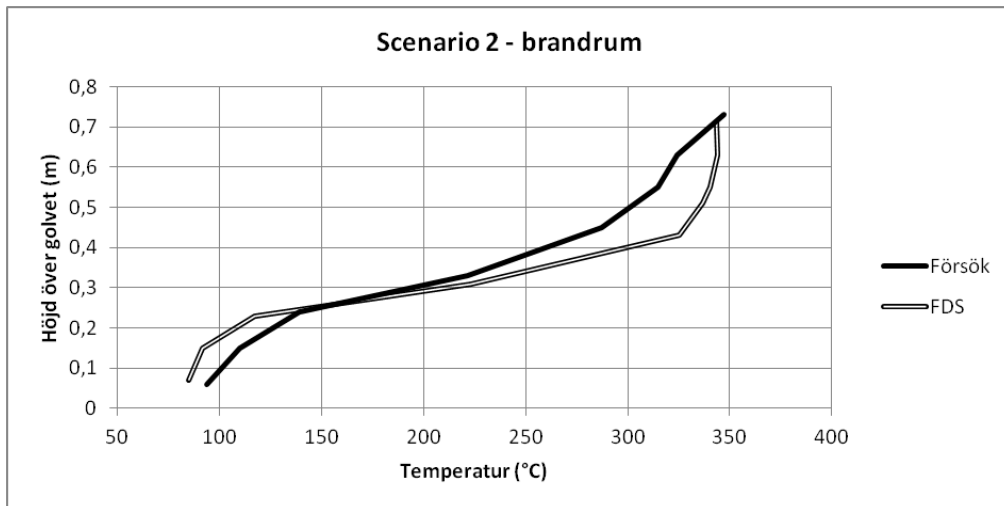
Figur 13. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



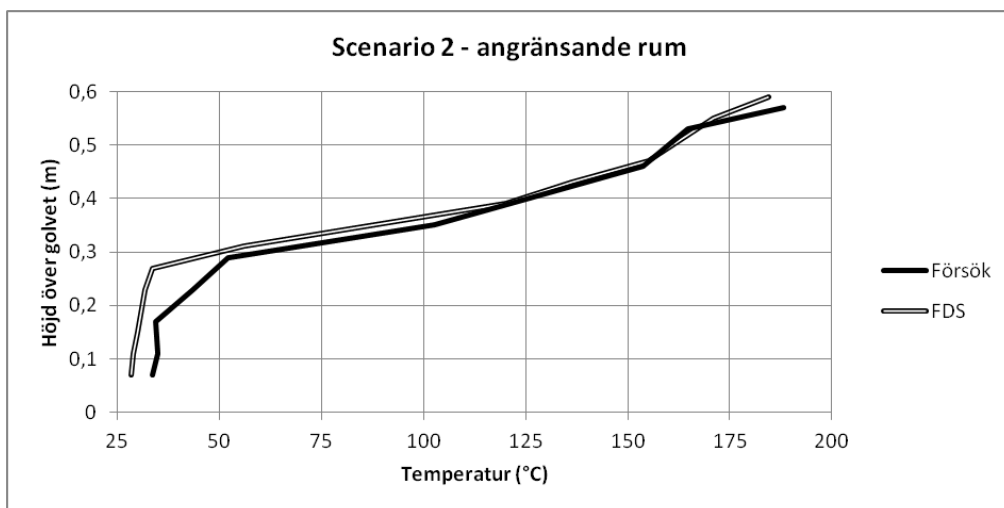
Figur 14. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



Figur 15. Jämförelse av temperaturökningen mellan försök utförda av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=300-900$  s.



Figur 16. Temperaturprofiler från mätningar av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS för scenario 2 i brandrummet. Resultaten har medelvärdesbildats över två minuter kring tiden 600 s,



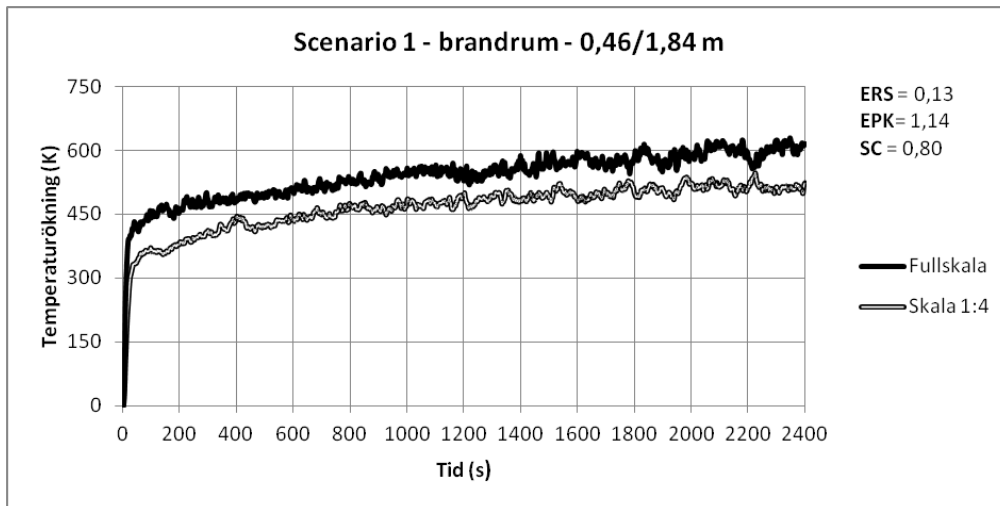
Figur 17. Temperaturprofiler från mätningar av Johansson et al. (2014) och simuleringar i FDS för scenario 2 i det angränsande rummet. Resultaten har medelvärdesbildats över två minuter kring tiden 600 s,

## 6.2 Jämförelse mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala

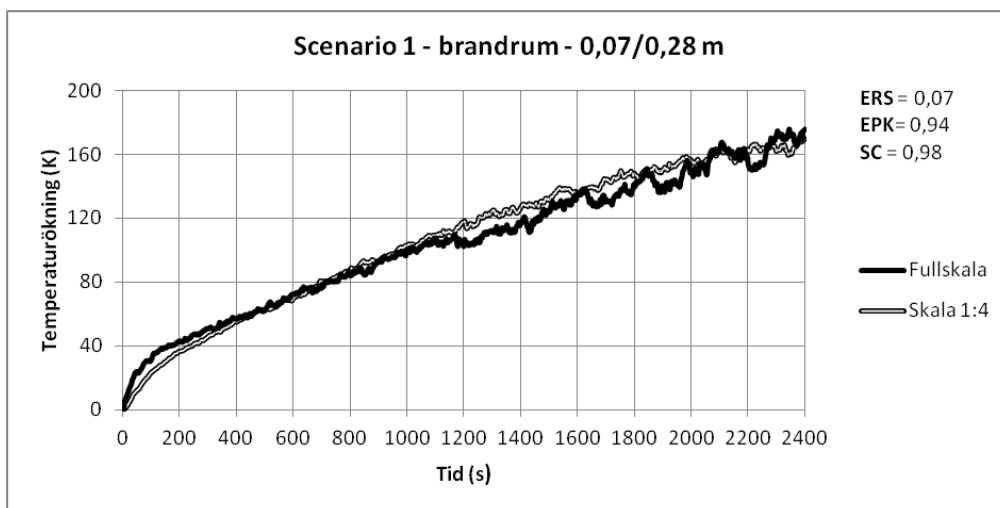
Jämförelserna mellan simuleringsresultat i olika skalor sker i samma positioner som jämförelserna mellan försöken och FDS i avsnitt 6.1. Resultaten presenteras i fullskaletid, det vill säga att tiden i skala 1:4 har multiplicerats med 2, se tabell 1. ERS, EPK och SC är därför på motsvarande sätt framtaget mellan att  $t=600$  s och  $t=1800$  s. Slutligen presenteras också temperaturprofiler vid tidpunkten 1200 s.

### 6.2.1 Scenario 1

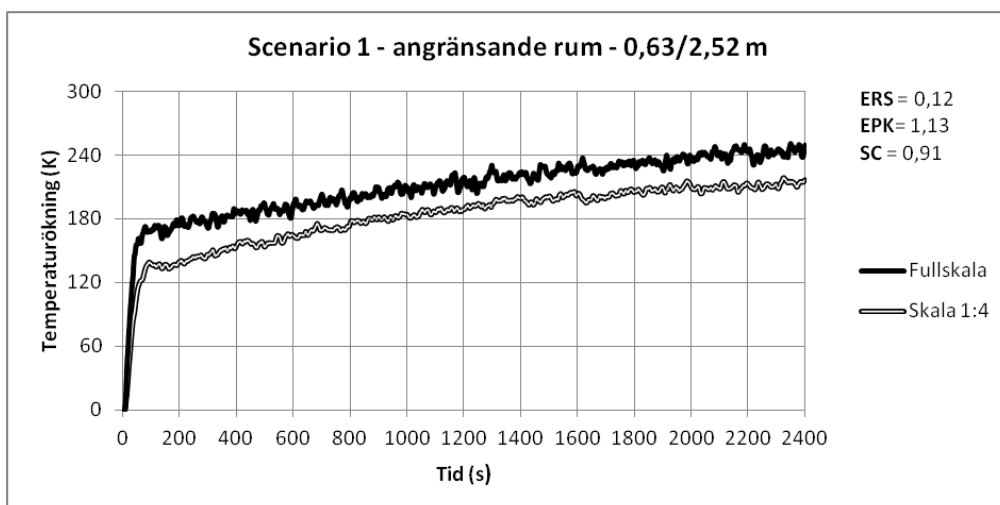
Här presenteras jämförelserna mellan fullskala och skala 1:4 för scenario 1. Figur 18 – 21 visar jämförelser vid enskilda mätpunkter och figur 22 – 23 visar temperaturprofiler.



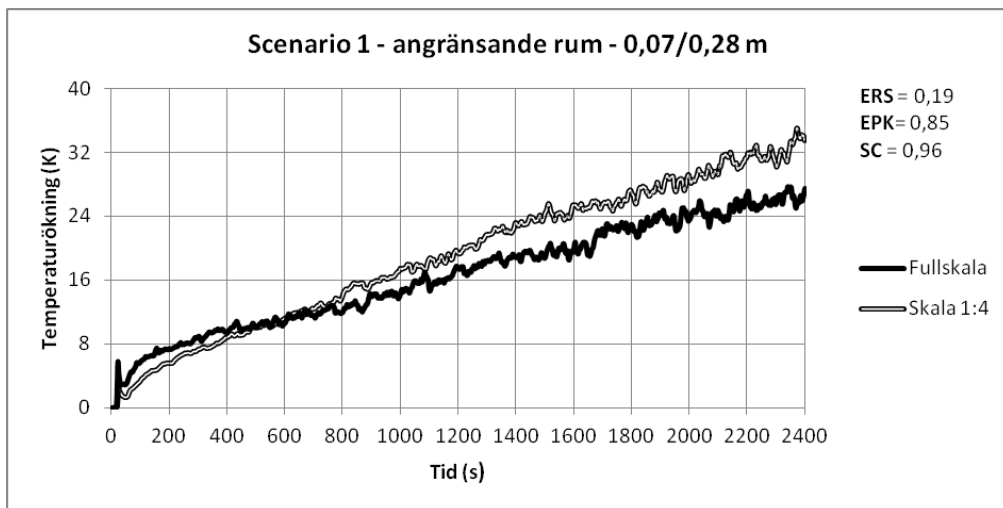
Figur 18. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



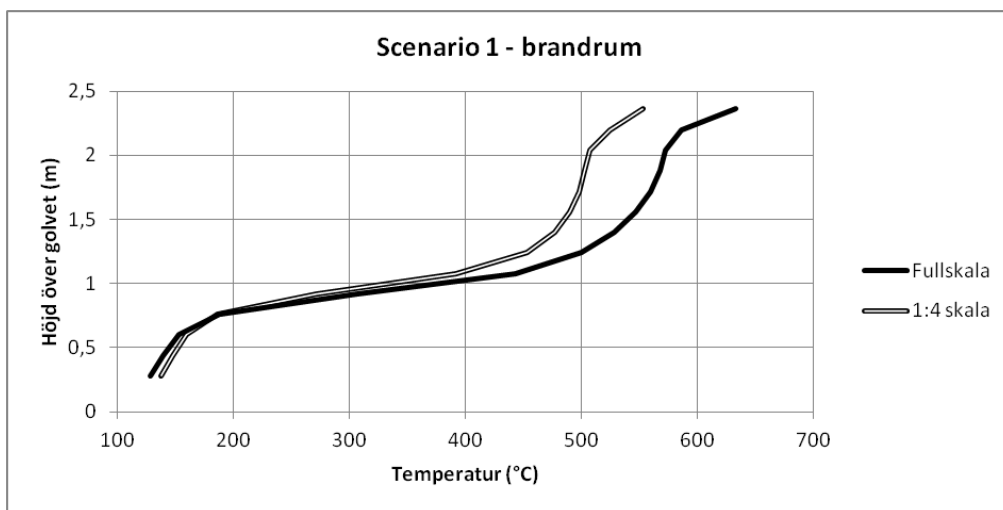
Figur 19. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



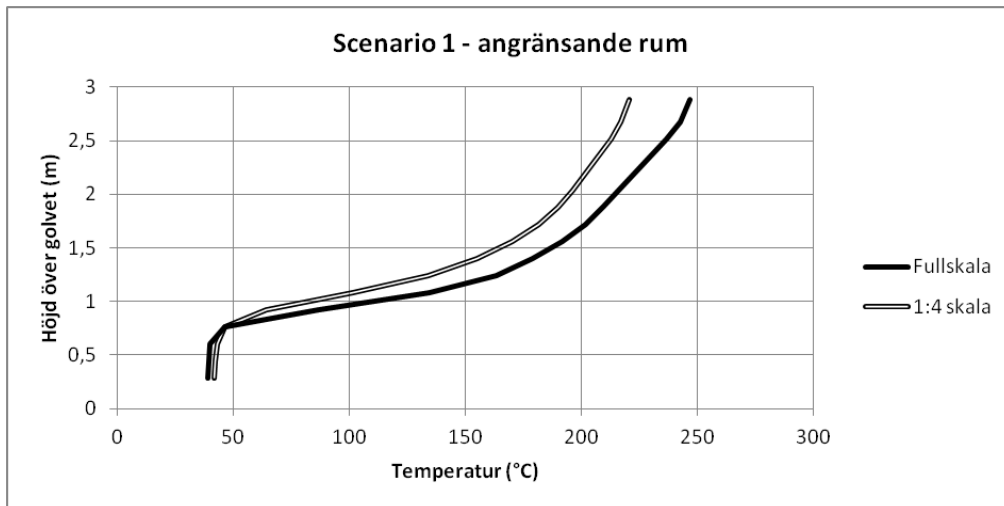
Figur 20. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



Figur 21. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



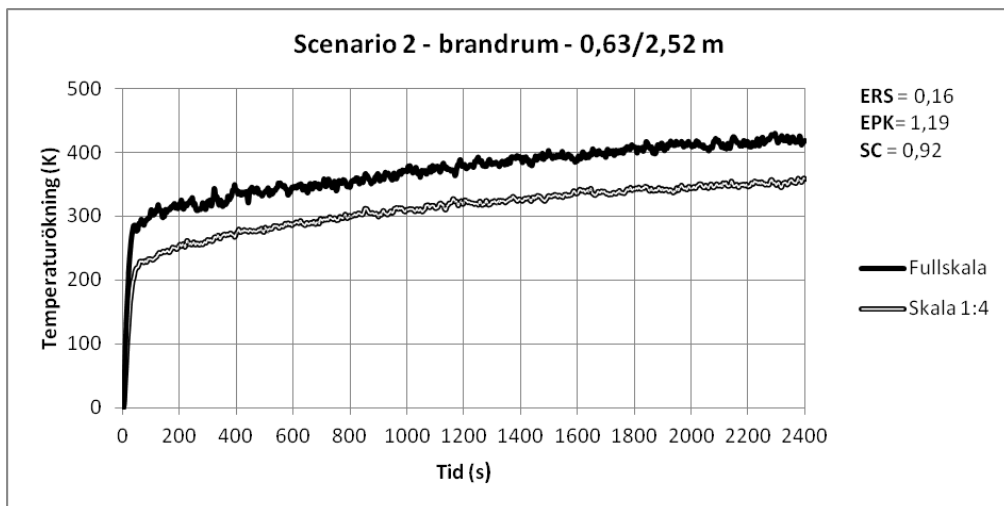
Figur 22. Temperaturprofiler från skala 1:4 och fullskala för scenario 2 i brandrummet. Resultaten har medelvärdesbildats över fyra minuter kring tiden 1200 s. Höjderna i skala 1:4 har skalats om till fullskala för att kunna göra jämförelsen.



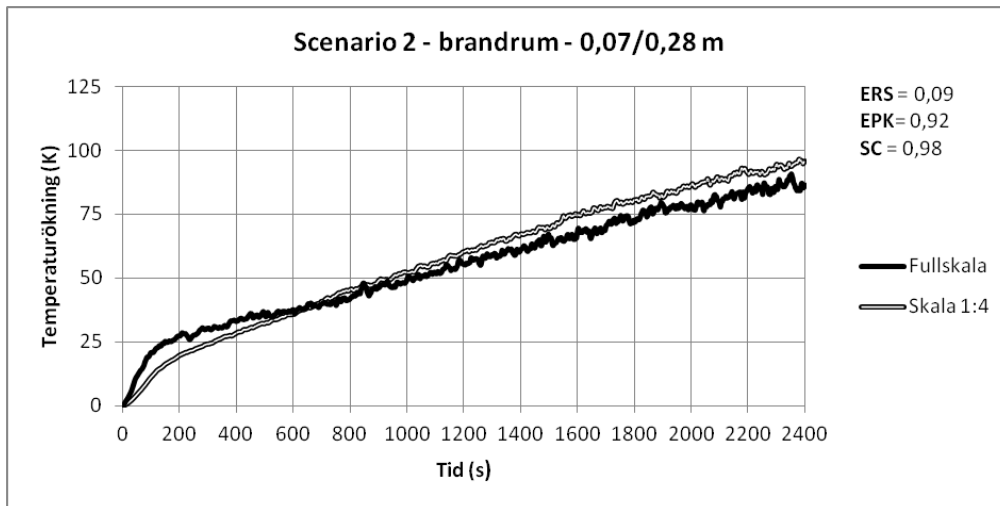
Figur 23. Temperaturprofiler från skala 1:4 och fullskala för scenario 2 i det angränsande rummet. Resultaten har medelvärdesbildats över fyra minuter kring tiden 1200 s, Höjderna i skala 1:4 har skalats om till fullskala för att kunna göra jämförelsen.

### 6.2.2 Scenario 2

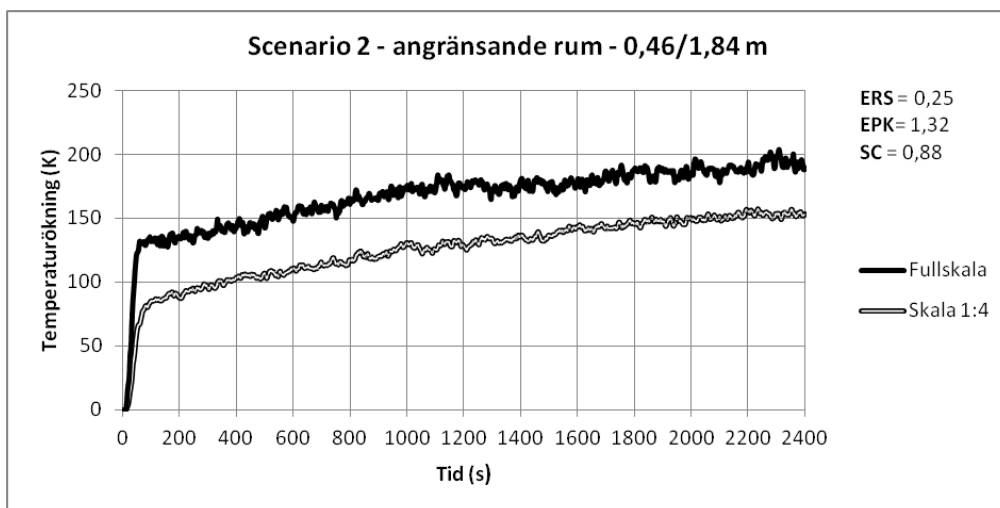
Här presenteras jämförelserna mellan fullskala och skala 1:4 för scenario 2. Figur 24 – 27 visar jämförelser vid enskilda mätpunkter och figur 28 – 29 visar temperaturprofiler.



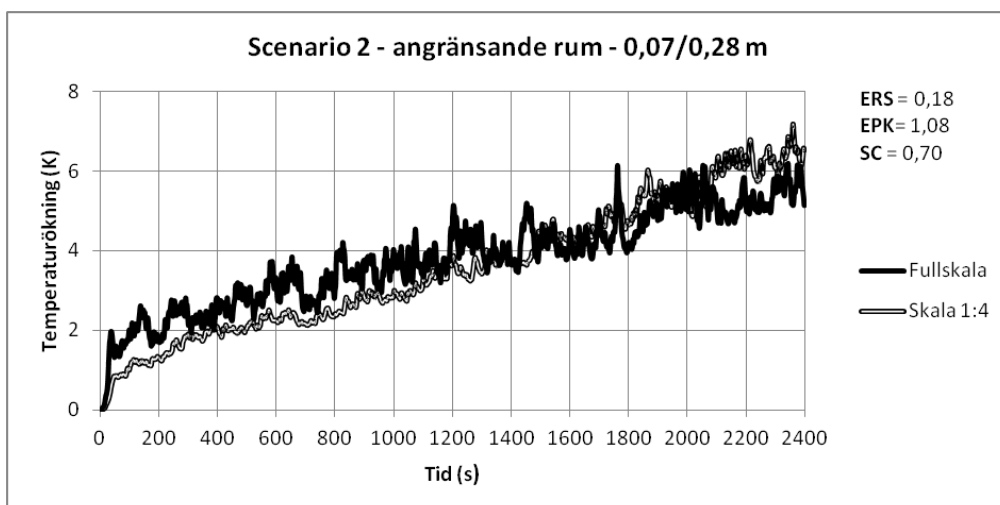
Figur 24. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



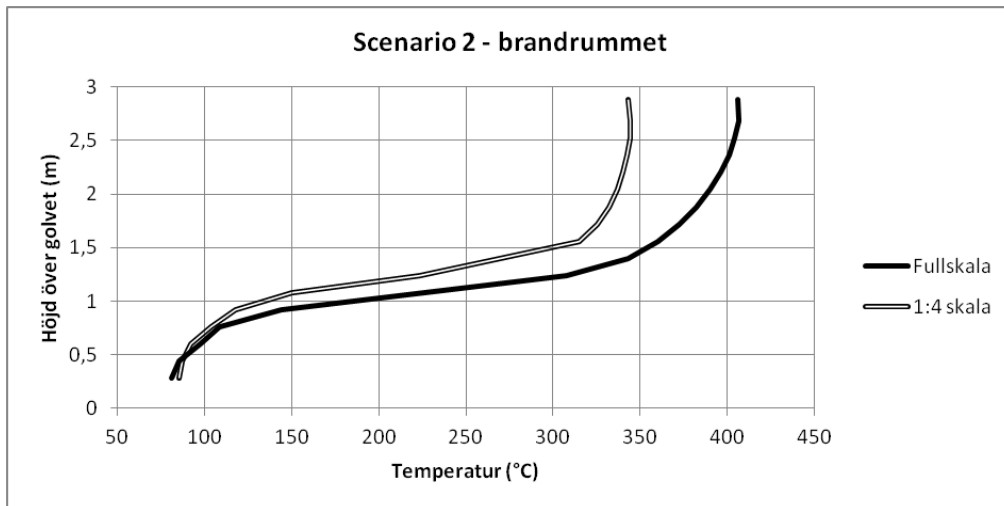
Figur 25. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



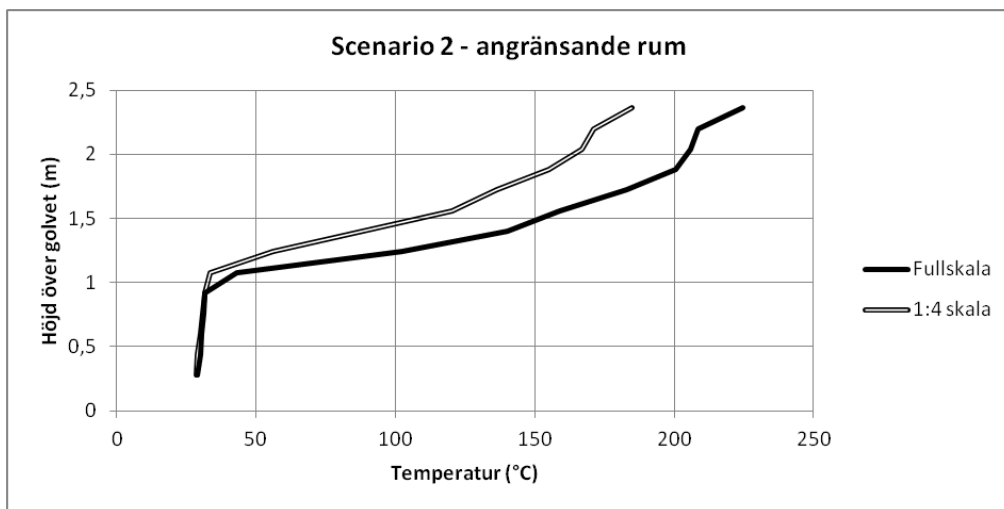
Figur 26. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



Figur 27. Jämförelse av temperaturökningen mellan simuleringar i skala 1:4 och fullskala i FDS. Tiden för resultaten i skala 1:4 har skalats om. ERS, EPK och SC är beräknat för tiden  $t=600-1800$  s.



Figur 28. Temperaturprofiler från skala 1:4 och fullskala för scenario 1 i brandrummet. Resultaten har medelvärdesbildats över fyra minuter kring tiden 1200 s, Höjderna i skala 1:4 har skalats om till fullskala för att kunna göra jämförelsen.



Figur 29. Temperaturprofiler från skala 1:4 och fullskala för scenario 1 i det angränsande rummet. Resultaten har medelvärdesbildats över fyra minuter kring tiden 1200 s, Höjderna i skala 1:4 har skalats om till fullskala för att kunna göra jämförelsen.

### 6.3 Känslighetsanalys

Simuleringarna som utfördes i känslighetsanalysen simulerades under 600 s respektive 1200 s i skala 1:4 respektive fullskala. Resultaten jämförs med resultaten från den ursprungliga simuleringen med hjälp av funktionalanalys. Jämförelsen görs vid höjden 0,46 m för brandrummet och 0,63 m för det angränsande rummet för varje simulering över tiden 300-600 s respektive 600-1200 s för simuleringarna i 1:4 skala och fullskala. Att simuleringarna i känslighetsanalysen jämförs med originalsimuleringarna under en kortare tid än vid tidigare jämförelser beror på att de simuleringarna kördes en kortare tid för att alla skulle hinnas med. I tabell 5 visas resultaten av känslighetsanalysen för simuleringarna i skala 1:4. ERS, EPK och SC visar avvikelser från den ursprungliga simuleringen.



**Tabell 5. Resultat från känslighetsanalysen för simuleringar i skala 1:4, ERS, EPK och SC är framtaget för t=300-600 s.**

<b>Förändring</b>	<b>ERS (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>EPK (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>SC (brandrum/ angränsande rum)</b>
Soot yield (-)	0,06/0,08	1,06/1,09	0,96/0,99
Strålningsfraktion (-)	0,03/0,02	0,99/1,00	0,92/0,98
Ursprunglig temperatur (°C)	0,02/0,02	1,00/1,01	0,86/0,97
Promatects emissivitet (-)	0,05/0,06	0,96/0,95	0,92/0,98
<i>k</i> (W/mK)	0,03/0,03	1,02/1,02	0,92/0,98
<i>c</i> (J/kgK)	0,06/0,08	1,06/1,09	0,92/0,96
Fläkt	0,06/0,02	0,94/1,00	0,95/0,97

I tabell 6 visas resultaten av känslighetsanalysen för simuleringen i fullskala. ERS, EPK och SC beräknas som avvikelse från den ursprungliga simuleringen.

**Tabell 6. Resultat från känslighetsanalysen för simuleringar i fullskala, ERS, EPK och SC är framtaget för t=600-1200 s.**

<b>Förändring</b>	<b>ERS (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>EPK (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>SC (brandrum/ angränsande rum)</b>
Bränsle	0,03/0,07	1,00/1,07	0,88/0,90
Väggmaterial och vägg tjocklek från skala 1:4	0,25/0,40	0,80/0,71	0,66/0,91

I tabell 7 visas resultaten av gridkänslighetsanalysen för både simuleringarna i skala 1:4 och fullskala. Jämförelserna görs på höjderna 0,46/1,84 m höjd i det mindre rummet och 0,63/2,52 m höjd i det större rummet. Avvikelsen beräknas från den simulering som har den grövsta griden och ex ERS mäter alltså hur mycket temperaturen har förändrats när gridstorleken halverats.

**Tabell 7. Resultat från gridkänslighetsanalysen för alla simuleringar. ERS, EPK och SC är framtaget för t=300-900 s för skala 1:4 respektive t=600-1800 s för fullskala.**

<b>Simulering</b>	<b>ERS (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>EPK (brandrum/ angränsande rum)</b>	<b>SC (brandrum/ angränsande rum)</b>
Scenario 1, skala 1:4	0,04/0,06	0,97/1,06	0,85/0,95
Scenario 2, skala 1:4	0,03/0,05	1,03/1,04	0,95/0,94
Scenario 1, fullskala	0,04/0,06	0,97/1,06	0,75/0,88
Scenario 2, fullskala	0,03/0,04	0,98/0,98	0,88/0,78



## 7 Analys

I analysen utvärderas resultaten från simuleringarna efter ett resonemang om hur funktionalanalysens olika mått kan tolkas.

### 7.1 Funktionalanalys

Det är inte helt självklart hur resultaten från funktionalanalysen ska tolkas. ERS är förmodligen enklast att förstå, det handlar helt enkelt om en genomsnittlig skillnad mellan de dataserier som jämförs. Måttet bör exempelvis gå att använda för att avgöra ifall temperaturmätningar från FDS i genomsnitt befinner sig inom ramen av mätosäkerheten vid försöken utförda av Johansson et al. (2014).

Även EPK är ett relativt lätt mått att förstå. Det liknar ERS på så sätt att det tar hänsyn till skillnaden i magnitud mellan dataserierna som jämförs. Från måttet går också att utläsa ifall dataserien som jämförelsen görs med ligger över eller under dataserien som jämförelsen utgår ifrån. Är EPK  $> 1$  så ligger dataserien som jämförelsen utgår ifrån i genomsnitt högst och om EPK  $< 1$  så ligger den lägre.

Att avgöra vad som är ett bra värde för ERS och EPK beror på vilka krav som ställs på jämförelsen. Då en gridkänslighetsanalys genomförs skulle ERS=0,15 vara relativt dåligt och det är möjligt att ytterligare simuleringar hade behövt genomföras för att resultaten inte ska vara så pass beroende av griden. I fallet med skalning skulle det till exempel gå att dra paralleller till hur stora mätosäkerheterna är. För försöken utförda av Johansson et al. (2014) bedömdes den till 12 %. Om skalningen inte bidrar med en större osäkerhet än vad mätinstrumenten förväntas göra så bedöms det vara ett bra resultat. Sett till de praktiska och kostnadsmässiga fördelarna med skalningen bör även ett något större fel ofta gå att acceptera, vilket skulle kunna ligga kring 20 %. Värden för ERS kring 0,1 bör därför ses som mycket bra när resultat mellan skalor jämförs och även resultat kring 0,2 bör ses som bra.

SC är något krångligare än de båda andra värdena, dels för att det rent intuitivt är svårare att förstå och dels för att den som genomför beräkningarna själv måste välja värde för  $s$  så att den slumpmässiga variationen inte inverkar på resultatet. I bilaga 2 redovisas hur  $s$  väljs ut och tiden används sedan i alla jämförelser, 200 s i tid för skala 1:4 och 400 s för tid i fullskala. Problemet då blev att vissa av dataserierna uppvisade en större slumpmässig variation vilket resulterade i betydligt lägre värden för SC än vad som verkar rimligt. Jämför till exempel figur 12 och figur 18. I båda figurerna ser dataserierna ut att följa varandra väldigt bra, ändå så är SC=0,95 i den ena och 0,80 i den andra. Att SC blir så otroligt känsligt för den slumpmässiga variationen beror troligtvis på att temperaturförändringarna över de tidsperioder som jämförs är små i jämförelse. I de figurer där det sker en kraftigare ökning av temperaturen (sett till hur hög temperaturen är då jämförelsen startar vid 300/600 s), exempelvis figur 19 och figur 25, pekar SC på att kurvornas utseende är näst intill identiskt då SC=0,98. På grund av detta bedöms SC i den här rapporten vara ett dåligt mått på hur väl kurvorna följer varandra och kommer inte väga tungt när det gäller bedömningar hur väl två kurvor följer varandra i avsnitt 7.2 och 7.3. SC kan dock i andra sammanhang där kurvornas trender är betydligt större än den slumpmässiga variationen vara ett bra mått.

### 7.2 Jämförelse av försök och simuleringar

Sett till temperaturprofilerna i figur 10 – 11 och 16 – 17 så ser temperaturskillnaderna ut att vara störst i den övre delen av rummen, förutom i det angränsande rummet i scenario 2. I den övre delen av rummen så ser FDS ut att i samtliga fall ha överskattat temperaturen jämfört med försöksresultaten. Som mest är ERS=0,22 och i de övriga tre fallen är ERS  $< 0,15$ . Sett till att mätosäkerheten för försöken har bedömts vara 12 % hamnar FDS-resultaten en liten bit utanför det området. I de nedre delarna av rummen är ERS  $\leq 0,10$  förutom i ett av fallen, figur 15, där

ERS=0,44. I det fallet är dock den totala temperaturökningen under försöket väldigt liten och skillnaden i resultat mellan FDS och försöken på ett par grader ser därför ut som en väldigt stor skillnad.

För att få en uppfattning om hur skillnaden mellan resultaten har uppstått går det att se till känslighetsanalysen. En liten del av skillnaden kan förmodligen förklaras med att griden är för grov. Det är dock förmodligen inte den främsta förklaringen eftersom att i gridkänslighetsanalysen, tabell 7, så går det att se att resultaten som jämförs inte har förändrats mer än 3 – 6 %. I brandrummet för scenario 1 blev det något varmare när cellstorleken minskades men i det angränsande rummet blev det svalare och för scenario 2 blev det svalare i båda rummen. Skulle ytterligare en halvering av cellstorleken genomföras bör resultaten inte förändras mer än det och förmodligen inte ens lika mycket.

I alla indata som används för simuleringarna finns det dock en osäkerhet. Det gäller dels hur branden är uppbyggd då strålningsfraktionen inte är helt säker, i källan till det använda värdet angavs flera olika värden. Värdet för *Soot Yield* var ett antagande baserat på att metan sotar lite, något som också uppmärksammades under försöken. Ett litet fel i båda dessa indataparametrar kan ha påverkat resultaten i FDS några procent. Även vad det gäller indata för Promatect finns en osäkerhet. Johansson et al. (2014) anger till exempel en annan värmekapacitet för materialet än vad som gick att hitta då simuleringen byggdes upp (Promat Czech Republic, 2014). Att värmekapaciteten hämtades från ett informationsblad från företagets tjeckiska filial berodde på att den inte var angiven i det svenska informationsbladet. Även för densitet och värmeledningsförmåga finns dock en osäkerhet, även om samma värden som Johansson et al. (2014) anger används i simuleringarna. Dels så förändras värmeledningsförmågan då materialet värms upp, vilket inte togs hänsyn till i simuleringarna. Hade det tagits med att värmeledningsförmågan ökade med temperaturen så hade mer värme kunnat ledas bort från modellen i FDS och temperaturerna hade blivit något lägre och därmed mer lika de som mättes upp vid försöken. Johansson et al. (2014) anger också att materialparametrarna kan tänkas förändras då försöken utförs upprepade gånger och materialet då hela tiden blir utsatt för höga temperaturer. Även det kan ha bidragit till den skillnad som finns.

När försöken utfördes var försöksuppställningen placerad under en huv så att brandgaserna kunde föras bort. I simuleringarna togs inte huven med eftersom att det skulle ha inneburit att beräkningsvolymen hade fått utökats och att simuleringstiden därmed hade ökat. I känslighetsanalysen kördes dock en simulering med en fläkt för att kunna se vilken inverkan det skulle ha på resultaten. Det visade sig att det orsakade en liten skillnad, ERS=0,06 i brandrummet.

Då det finns osäkerheter när effektutvecklingen mäts upp, se avsnitt 2.3, finns det såklart en risk att en annan effektutveckling än den från försöken användes i simuleringarna. Även detta kan ha haft en inverkan på skillnaden i temperaturer mellan försöken och simuleringarna.

Sammanfattningsvis och med hänsyn till de osäkerheter som fanns för indata så anses ändå FDS ha kunnat simulera scenarierna med en god säkerhet och där fel orsakade av en otillräcklig gridupplösning kan anses vara små.

### **7.3 Jämförelse av simuleringar i fullskala och skala 1:4**

I temperaturprofilerna, figur 22 – 23 och figur 28 – 29, syns att skillnaderna mellan skalorna är som störst i den övre delen av rummen och att skillnaden verkar öka med temperaturen i varje rum. I figur 18 – 21 och figur 24 – 27 syns också att skillnaderna är större i de högre mätpunkterna. Det syns även att skillnaderna mellan skalorna är något större för scenario två och det gäller speciellt i den övre delen av det angränsande rummet. Att skillnaden är större för

scenario två skulle kunna bero på att den yttre öppningen är större i det scenariot vilket innebär att den enda typen av värmeförlust som faktiskt har kunnat skalas har fått en mindre betydelse.

I avsnitt 7.2 diskuterades att indata till simuleringarna av scenarierna i skala 1:4 kan avvika från de förhållanden som rådde då försöken genomfördes. Eftersom att dessa indata ligger till grund för skalningen är det också relevant att fråga sig hur dessa avvikelser kan påverka skillnaderna som uppstår. Genom att jämföra resultat direkt från försöken med de från simuleringarna i fullskala är det uppenbart att skillnaden mellan resultat i fullskalan och skala 1:4 skulle bero på fler orsaker än bara skalningen. Genom att istället jämföra simuleringensresultaten med varandra kommer skalningen faktiskt ske från den ena skalan till den andra. Med tanke på att det är simuleringensresultat som jämförs med varandra är det också lättare att kontrollera att det är just de parametrar som skalas som förändras och inget annat. De skillnader som uppstår i jämförelserna bör alltså till största del bero på just skalningen så länge som simuleringarna kan anses representera verkligheten på ett korrekt sätt. För att säkerställa förmågan att representera verkligheten genomfördes en gridkänslighetsanalys. Den visade att vid en halvering av cellstorleken för alla scenarier och skalor så förändrades resultaten inte med mer än 3 – 6 %. Det anses vara en liten skillnad, se (Frantzych & Nystedt, 2011). Värt att nämna är att simuleringarna i både fullskala och skala 1:4 kördes med samma kvoter på  $D^*/dx$  för att de skulle vara av samma kvalitet. Att resultaten förändras ungefär lika mycket i både skala 1:4 och fullskala bör tyda på att de också är av ungefär samma kvalitet.

Att peka ut vilka skalningsregler som har fungerat bra samt vilka som fungerat mindre bra eller inte kunnat skalas och därmed orsakat avvikelser är inte helt lätt. Sett till hur väl kurvorna följer varandra så verkar sambandet för att skala tidsförloppet fungera väl. Speciellt väl syns hur kurvorna följer varandra i den nedre delen av rummen. I stort sett alla andra skalningssamband har en direkt koppling till temperaturerna. Eftersom att effektutvecklingen skalas med en faktor 32 kommer en liten avvikelse från den planerade effektutvecklingen i en mindre skala innebära relativt stora skillnader i den större skalan. En uppmätt ökning av effektutvecklingen för scenario 2 från 19 till 21 kW resulterar i en ökning från 608 till 672 kW i fullskala. Med tanke på att effektutvecklingen lätt går att kontrollera för en simulering bör det inte ha orsakat några större fel i det här fallet. Men då skalade försök genomförs praktiskt skulle det kunna vara ett problem.

Att skalningen av värmeledningen är betydelsefull går att se i känslighetsanalysen, se tabell 7. När samma väggmaterial och vägg tjocklek användes i båda skalorna ökade skillnaden i resultaten. För simuleringen i fullskala var  $ERS=0,25$  respektive  $0,40$  för brandrummet och det angränsande rummet. EPK var i sin tur lika med  $0,80$  och  $0,71$  vilket innebär att temperaturerna i fullskalan blev högre när likadana väggar användes som i skala 1:4. Även då skalningen av värmeledningen genomfördes i originalsimuleringarna så underskattades temperaturerna i skala 1:4 jämfört med fullskalan, men om skalningen av väggarna inte hade genomförts ser det ut som att temperaturerna i skala 1:4 hade underskattats ungefär dubbelt så mycket.

Då branden är placerad i mitten av det innersta rummet kommer öppningen till det andra rummet och i förlängningen också öppningen ut från modellen befinna sig i en rät linje från den. Det kommer att ske strålningsförluster från modellen och eftersom att strålningsförluster inte har skalats kommer en skillnad mellan skalorna att kunna uppstå på grund av detta. Samma sak gäller konvektiva förluster. Genom att se till den faktiska skillnad som har mätts upp mellan skalorna,  $ERS=0,12 - 0,25$  i den övre delen av rummen, och den ökade skillnaden som uppstod när skalningen av värmeledningen utelämnades så ger det en indikation på att värmeledningen faktiskt var viktigast att skala.

I de övre delarna av rummen varierar ERS mellan  $0,12$  och  $0,16$  med ett undantag i det angränsande rummet i scenario 2 är  $ERS=0,25$ . I de nedre och svalare delarna av rummen varierar ERS istället mellan  $0,07$  och  $0,19$  och där är alltså skillnaden något mindre. Speciellt i den

Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

nedre delen av brandrummen är skillnaden liten, där  $ERS=0,07$  respektive  $0,09$  för scenario 1 och 2. Det innebär en skillnad som till större delen av tiden är mindre än  $10\text{ °C}$ . Sett till att  $ERS=0,12$  -  $0,13$  i den övre delen av rummen för scenario 1 medan  $ERS=0,16$ - $0,25$  i den övre delen av rummen för scenario 2 så syns det också tydligt att små skillnader i försöksuppställning kan resultera i märkbara skillnader för hur väl skalningen fungerar.

## 8 Diskussion

Diskussionen förs utifrån de frågeställningar som ställdes upp i avsnitt 1.3 och är därför uppdelad i tre delar. Frågeställningarna upprepas här.

1. Hur ska skalning ske för att de viktigaste aspekterna av ett brandtekniskt experiment ska bevaras?
2. Vilken kunskap finns i dagsläget angående graden av osäkerhet som orsakas av skalning i brandtekniska experiment?
3. Hur stort kan felet förväntas bli för temperaturen då skalning används i ett brandtekniskt experiment?

### 8.1 Frågeställning 1

För att temperaturer, hastigheter o.s.v. ska stämma mellan skalorna behöver den skalade modellens värmebalans, alltså hur mycket energi som frigörs i, respektive försvinner från modellen, skalas. Effektutvecklingen kan skalas enligt  $\Pi_2 (Q^*)$ . Energiförlusterna från modellen går inte att hantera på riktigt samma sätt och i litteraturen som användes hanterades förluster antingen inte alls, eller så skalades värmeledningen. I en av källorna angavs att konvektionen är svår att skala då en anpassning av  $h_c$  är svår att åstadkomma genom att förändra material som används. Att försöka justera  $h_c$  samtidigt som ledningen skalas och väggmaterial byts ut av den anledningen bör rimligtvis bli ännu svårare. För att skala strålningen behöver den omgivande temperaturen förändras. Det är dels opraktiskt, ett försök som i fullskala har en ursprunglig temperatur på 20 °C skulle om det skalas ned med en faktor 4 istället behöva ha en ursprunglig temperatur på -40 °C. Att förändra den omgivande temperaturen kommer dessutom att påverka hur andra grupper kan skalas då dessa istället förutsätter att den omgivande temperaturen är densamma i båda skalorna.

Något som poängteras är att då skalning är ett ofullständigt redskap behöver den som genomför det skalade experimentet själv ta ställning till hur det påverkar resultaten att ignorera de dimensionslösa grupper man gör. Sett till att ledningen är lättare att skala än strålningen följer också att vissa försöksuppställningar där en mindre del av förlusterna sker via strålning blir lämpligare att skala än andra där strålningen står för en större del av modellens energiförluster. Självklart kommer det inte alltid gå att välja en modell där förluster via ledning dominerar, att ett försök över huvud taget genomförs beror sannolikt på ett intresse för en viss försöksuppställning.

Det saknas riktigt tydliga riktlinjer för hur det ska säkerställas att branden fortsätter att vara turbulent i en mindre skala. Quintiere (2012) ger ett riktmärke på 0,3 m som minsta takhöjd för att kunna behålla det turbulenta flödet, men det kommer variera från fall till fall beroende på hur stor effektutvecklingen är i fullskala. Vikten av att bevara ett turbulent flöde för att bibehålla en likhet mellan skalorna framhålls av Tilley et al. (2013) och den som genomför skalning bör alltså försäkra sig om att den skalade modellen uppvisar en tillräcklig turbulens.

Klart är att det inte finns något färdigt ”recept” för hur skalning av ett försök ska gå till. För att hålla koll på vilka dimensionslösa grupper som behöver användas får utföraren se till hur energi frigörs i, och förs ut ur modellen. De grupper som faktiskt är möjliga att använda får därefter identifieras och vad det innebär att ignorera övriga undersökas. Ifall försöket innehåller fler delar, som exempelvis en sprinkler, behöver utföraren självklart även se till vilka grupper som är applicerbara för att skala den. I varje enskilt fall är det då också viktigt att motivera valet av de dimensionslösa grupper som används.

### 8.2 Frågeställning 2

Det andra frågeställningen angående dagens kunskapsläge om osäkerheten som orsakas av skalning behöver ses i ljuset av att skalningen alltid är ofullständig. Det innebär dels att det i stort

sett oundvikligen kommer finnas ett fel av någon storlek men beroende på hur försöksuppställningen ser ut kommer det också innebära att storleken på felet varierar förutsatt att samma skalningsregler använts. Detta eftersom att det vid olika försöksuppställningar kommer vara olika lämpligt att till exempel enbart skala värmeledningen och inte konvektionen eller strålningen. Många försöksuppställningar kommer dock vara mer eller mindre lika varandra. De rapporter som tas upp i avsnitt 3.1 och där korrektheten hos resultat inhämtade i skalformat bedöms har främst kollat på försöksuppställningar som består av ett eller flera rum med en brand och en öppning till omgivningen. Även de scenarier som undersöks i den här rapporten är av den typen. Resultaten från de undersökta rapporterna, samt denna, angående osäkerheter orsakade av skalning bör gå att applicera vid liknande försöksuppställningar för att åtminstone kunna göra en uppskattning av osäkerheten.

I de flesta av rapporterna anser författarna att temperaturmätningar stämmer bra överens mellan olika skalor. Wang et al. (2008) anger en skillnad i uppmätta maxtemperaturer på 10-20 % beroende på brandens storlek. Jämförelsen görs mellan skala 1:4 och 1:8 så geometriskt skiljer det en faktor 2 mellan skalorna, det blir alltså ungefär som att jämföra resultat från fullskala och skala 1:2. I rapporten av Hertzberg och Li (2013) kommenteras skillnader/likheter mellan resultaten i de undersökta skalorna i kvalitativa termer. Därför gjordes egna uppskattningar av hur stora skillnaderna var mellan skalorna. Mellan fullskala och skala 1:2 skilde det cirka 5 % vid de två lägre effektutvecklingarna och upp mot 10 % vid den högre. Mellan fullskala och skala 1:3,5 skilde det cirka 5 % och vid de två högre effektutvecklingarna skilde det 10 – 20 %. Vid de två högre effektutvecklingarna underskattas temperaturerna i skala 1:3,5 och i skala 1:2 underskattas temperaturen vid den högsta effektutvecklingen. Resultaten i rapporten pekar på att både hur mycket en modell skalas och hur stor effektutvecklingen är kommer påverka hur osäkra resultaten är. Att det påverkar hur mycket modellen skalas verkar naturligt sett till att en kraftigare skalning bör innebära att ofullständigheter i skalningen blir mer tydligare när större förändringar har genomförts gentemot fullskalan. Att storleken på effektutvecklingen har betydelse skulle dels kunna bero på att en större del av energin kan lämna modellen i form av strålning eller att turbulensförhållandena förändras. Även positionerna för temperaturmätningarna skulle kunna spela roll då effekten av strålning avtar snabbt då avståndet ökar.

Även Quintiere (1978) anser att temperaturerna stämmer bra överens mellan fullskala och skala 1:7m, figur 3 visar i stort sett den största skillnaden som redovisades. Att skillnaderna skulle vara något större här verkar rimligt sett till att det är en kraftigare skalning som genomförts.

Chow och Henry (2008) nådde inte speciellt bra resultat. Deras temperaturökning i modellen översteg kraftigt den som hade skett i fullskala. Genomförandet av skalningen verkar dock i vissa avseenden något tveksamt. Dels så har ingen hänsyn tagits till värmeförlusterna från modellen, vilket uppenbart kommer påverka temperaturerna. Dessutom så är modellen så kraftigt skalad (skala 1:26,5) att den högsta effektutveckling de använder är på 500 W vilket då motsvarar ca 1,8 MW i fullskala. Möjligtvis kan den stora skillnaden ha lett till att mindre omgivande sval luft blandades in i plymen och att temperaturerna i takhöjd av den anledningen är högre än vad de är i fullskalan. Då resultaten i andra rapporter visar att temperaturer avviker mer ju kraftigare modellen är skalad går det också att se det som att resultaten helt enkelt passar in i det mönstret.

Slutligen så kan det vara värt att se till tunnelförsöken genomförda av Ingasson och Li (2010). Jämförelsen som de gör visar inte på några skillnader för en viss parameter när ett specifikt försök har skalats ned, utan snarare hur pass realistiskt ett försök med en tunnelbrand kan genomföras när det har blivit kraftigt skalat. Jämförelsen de gör visar att det går att se samma övergripande mönster som i tidigare genomförda fullskaleförsök, men några direkta jämförelser görs inte. Det som ska undersökas är hur olika ventilationshastigheter påverkar brandförloppet vilket de också bedömer fungera bra i skala 1:23. Så, om det primära syftet med skalade försök är



att upptäcka mönster och inte att mäta temperaturer med en viss exakthet så bör det rimligtvis gå att använda sig av skalade försök även när det går att misstänka att de uppmätta temperaturerna inte kommer vara fullständigt rättvisande.

### 8.3 Frågeställning 3

Går det utifrån de genomförda simuleringarna först och främst att se hur stort fel som orsakas av skalningen i just dessa specifika fall? Om det gör det, går det också att dra några slutsatser om hur dessa skillnader ser ut i det allmänna fallet?

Baserat på diskussionen i 7.2 och 7.3 så anses resultaten kunna ge en rättvisande bild av hur stor osäkerhet som orsakas av skalningen för dessa scenarier. Det fanns förvisso en skillnad mellan simuleringar och verklighet som låg utanför den angivna mätosäkerheten vid försöken (se avsnitt 7.2). Förklaringen till skillnaden gick dock troligtvis att finna genom att se till osäkerheten i den indata som används. Scenarierna som simuleras skiljer sig därmed i en liten utsträckning från försöken. Skillnaderna är dock små och storleken på skillnaderna mellan skalorna bör inte ha sett annorlunda ut ifall det hade gått att efterlikna försöken ännu bättre.

För att kunna avgöra ifall osäkerheten från skalningen i dessa scenarier säger något om osäkerheten som orsakas av skalning i andra fall är det nödvändigt att också se till litteraturstudien som genomfördes. Resultat från Hertzberg och Li (2013) samt Wang et al. (2008) pekar på att hur mycket en modell skalas samt vilken effektutveckling som används kommer påverka hur stort fel som skalningen orsakar. Effektutvecklingen är en del av försöksuppställningen och i de två scenarier som undersöktes i den här rapporten verkade det också som att skillnader i försöksuppställningen (olika stora rum och öppningar) orsakade skillnader i hur stort felet blev. Eftersom att skalningen är ofullständig och att det därmed kommer skilja mellan försöksuppställningar hur stor del av värmeförlusterna som påverkas av skalningen blir det också naturligt att felet som uppstår varierar då det är en följd av vad som inte går att ta hänsyn till vid skalningen. Resultaten i rapporten bör därför inte gå att applicera på vilka skalningar som helst.

Även om det inte går att säga något om felet som uppstår vid alla skalningar bör det ändå gå att se de uppmätta skillnaderna som riktmärken vid liknande förhållanden. Både Hertzberg och Li (2013) och Wang et al. (2008) kollar på rumsbränder med en öppning ut och även i den här rapporten är det just en rumsbrand med en öppning ut som undersöks, öppningen ansluter i det här fallet dock till ytterligare ett rum. Wang et al. (2008) kollade på skillnaden mellan simuleringar i skala 1:4 och 1:8 där felet var  $< 10\%$  respektive  $< 20\%$  beroende på hur stor effektutveckling som användes. Hertzberg och Li (2013) mätte upp skillnader mellan fullskala och skala 1:2 som uppskattas vara mellan  $5\%$  och  $10\%$  i den övre varma delen av rummet beroende på vilken effektutveckling som användes. Skillnaderna mellan fullskala och skala 1:3,5 uppskattas vara  $10 - 20\%$  förutom för den lägsta effektutvecklingen där skillnaden är ungefär  $5\%$ . För scenario ett i den här rapporten är skillnaden mellan fullskala och skala 1:4 mellan  $10\%$  och  $20\%$  för både brandrummet och det angränsande rummet. För scenario 2 är också skillnaden i brandrummet mellan  $10\%$  och  $20\%$  men i det angränsande rummet är skillnaden istället kring  $25\%$ . I ett försök att sammanfatta dessa resultat så kan en modell som skalats ned med faktor 2 förväntas få ett fel kring  $10\%$  och en modell som skalats ned med en faktor 4 förväntas få ett fel mellan  $10\%$  och  $20\%$ . Siffrorna avser brandrummets övre del och enligt resultaten i den här rapporten bör felet vara något mindre i rummets undre och svalare del. I ett rum som ansluter till brandrummet behöver inte skillnaden vara större (se scenario 1) men resultaten från scenario 2 pekar på att de kan vara det. Felet skulle då för det anslutande rummet istället kunna ligga mellan  $10\%$  och  $30\%$ . De här siffrorna skulle kunna vara ett riktmärke vid skalade försök ned till skala 1:4 av rumsbränder med en öppning ut vars storlek motsvarar en dörr.

I avsnitt 7.3 noterades att skillnaden mellan skalorna såg ut att bero på temperaturen med den minsta skillnaden vid golvnivå där temperaturen var lägst och sedan en ökad skillnad ända upp till taket där temperaturen var som högst. Jämför man figur 22 – 23 och 28 – 29 och ser till samma temperatur i alla figurer så är skillnaden mellan skalorna dock inte lika stor, främst om temperaturen för något rum mäts upp vid den höjd där det varma brandgaslagret tar vid. Vid övriga höjder är det möjligt att det skulle gå att ta fram ett samband som relaterar osäkerheten till temperaturökningen. Att osäkerheten är kopplad till storleken på temperaturökningen skulle kunna bero på att strålningen är kraftigt beroende av temperaturen och när den inte skalas kommer felet vara direkt kopplat till hur stor del av värmetransporten som sker i form av strålning.

Det verkar inte vara lika sannolikt att resultaten i de mindre skalorna skulle ligga antingen på den varmare eller svalare sidan av temperaturmätningarna i fullskala. För båda de scenarier som undersöks i den här rapporten underskattas temperaturen i skala 1:4 bortsett från den delen av rummet som ligger närmast golvet. Även Ingasson och Li (2010) ser ut att ha underskattat temperaturerna i deras skalmodell. I rapporten av Hertzberg och Li (2013) underskattas temperaturerna i skala 1:2 och 1:3,5 för de två högre effekterna som de använder. Att temperaturer underskattas i mindre modeller skulle kunna bero på att strålningen avtar med avståndet i kvadrat. Om flammornas temperatur inte skiljer väldigt mycket mellan skalorna och avståndet från flammorna till en öppning ut från rummet har minskats så skulle det kunna vara så att en större del av energin lämnar modellen direkt i form av strålningen istället för att värma upp brandgaserna inne i rummet.

I det stora hela anses möjligheten att skala experiment vara ett effektivt verktyg. För att få en bättre bild av hur felet påverkas av graden av skalning och effektutvecklingens storlek kan med fördel vidare studier genomföras eftersom att de studier som finns idag inte har haft som avsikt att kvantifiera storleken på felet. Då skalningen är ofullständig kommer det aldrig gå att ta fram ett svar på felets storlek som gäller vid alla tillfällen. Detta då det är så många parametrar som ingår och påverkar resultaten och dessutom varierar från fall till fall. Det går dock att komma fram till ungefärliga värden för osäkerheter som i den här rapporten, vilka bör kunna appliceras på liknande skalade scenarier. En osäkerhet på 10 – 20 % för temperaturerna i brandrummet, eller upp till 30 % för ett angränsande rum, är inte mycket större än mätosäkerheterna kan vara. Så länge utövaren är medveten om och kan ta hänsyn till att skillnader av den här storleken kan uppstå på grund av skalningen bör det fungera bra att skala experiment och också lita på resultaten.

## **9 Slutsatser**

Följande slutsatser har gått att dra gällande de frågeställningar som sattes upp i avsnitt 1.3 och senare diskuterades i avsnitt 8.

1. För att bevara de viktigaste aspekterna av ett brandtekniskt experiment då det skalas behöver utföraren ta hänsyn till effektutveckling och energiförluster från modellen, det är dock inte möjligt att ta hänsyn till alla aspekter och skalningen kommer vara ofullständig. Utöver det behöver de turbulenta förhållandena bevaras och modeller kan därför inte göras hur små som helst.
2. Det har genomförts försök för att se hur stort fel som uppstår för olika variabler vid skalade försök. Det är svårt att dra några generella slutsatser kring storleken på felet från enstaka rapporter eftersom att felet beror på så många olika parameterar, men för scenarier som liknar de som undersökts bör det gå att få en viss vägledning om hur stort fel som det går att förvänta sig
3. Storleken på felet kommer variera beroende på graden av skalning, typ av försöksuppställning och storleken på effektutvecklingen. Vid en rumsbrand med en dörr ut går det att förvänta sig ett fel kring 10 % för temperaturen i det varma brandgaslagret då skalning sker med en faktor 2 och ett fel mellan 10 % och 20 % då skalning sker med en faktor 4. Felet kan förväntas vara något mindre i den undre delen av rummet och felet kan vara större i ett angränsande rum, < 30 % vid skalning med en faktor 4.



## **10 Förslag till fortsatta studier**

Baserat på vad som kommit fram under arbetet med rapporten lämnas här förslag till fortsatta studier inom området.

Då felet påverkas av hur kraftigt skalad modellen är skulle detta samband kunna undersökas närmare. Genom att undersöka samma modell utförd i flera olika skalor hade det kunnat vara möjligt att tydligare se hur mycket felet påverkas av att skalningen blir kraftigare och kraftigare.

Felet för temperaturen bedömdes kunna vara större i ett rum som är angränsande till brandrummet än i själva brandrummet. Det finns därför anledning att undersöka även detta samband närmare. Förslagsvis kan än mer komplicerade geometrier också undersökas för att se vilka begränsningar som kan finnas för skalade modeller i det avseendet.



## 11 Litteraturförteckning

Chow, W. K. & Henry, L. H. W., 2008. Scale modeling on natural smoke filling in an atrium. *Heat transfer engineering* 29(1), pp. 76-84.

Frantzich, H. & Nystedt, F., 2011. *Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*, Lund: Brandteknik och riskhantering, LTH, Lunds Universitet.

Guigard, S. E., Kindzierski, W. B. & Harper, N., 2000. *Heat radiation from flares*, Edmonton, Alberta: Science and Technology Branch, Alberta Environment.

Hertzberg, T. & Li, Y. Z., 2013. *Scaling of internal wall temperatures in enclosure fires*, Borås: SP Sveriges tekniska forskningsinstitut.

Ingasson, H. & Li, Y., 2010. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, Volym 45, pp. 371-384.

Ingasson, H., Wickström, U. & van Hees, P., 2001. *The Gothenburg Discotheque Fire Investigation. In: 9th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering*. Edinburgh, Interscience Communications.

Johansson, N., 2013. *Numerical experiments - a research method in fire science*. Lund: Media Tryck, Lunds universitet.

Johansson, N., Svensson, S. & van Hees, P., 2014. A study of reproducibility of a full-scale multi-room compartment fire. *Fire Technology*.

Johansson, N., van Hees, P. & Svensson, S., 2014. An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires. *Opublikerad vid skrivandet av den här rapporten*.

Karlsson, B. & Quintiere, J. G., 2000. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.

McGrattan, K. o.a., 2014. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 4: Configuration Management*, Baltimore, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.

McGrattan, K. o.a., 2014. *Fire Dynamics Simulator, User's Guide*, Baltimore, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.

Moodie, K. & Jagger, S., 1992. The King's Cross fire: Results and analysis from the scale model tests. *Fire Safety Journal*, Volym 18, pp. 83-103.

Peacock, R. D., Reneke, P. A., Davis, W. D. & Jones, W. W., 1999. Quantifying fire model evaluation using functional analysis. *Fire safety journal*, Volym 33, pp. 167-184.

Promat Czech Republic, 2014. <http://web.promatpraha.cz/>. [Online] Available at: <http://web.promatpraha.cz/download&kid=54> [Använd 21 Oktober 2014].

Promat Nordic, 2006. <http://www.promat.se/>. [Online] Available at: <http://www.promat.se/images/productimages/media/Promatect%20steel%202005.pdf> [Använd 21 Oktober 2014].

Quintiere, J. G., 1989. Scaling applications in fire research. *Fire Safety Journal*, Volym 15, pp. 3-29.

Quintiere, J. G., 2006. *Fundamentals of fire Phenomena*. West Sussex: John Wiley & sons, LTD.

Oscar Lilja  
*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

Quintiere, J. G., 2012. *The use of scale modeling in fire safety design and investigation*. Hong Kong, China, 9th International Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods.

Quintiere, J. G., McCaffrey, B. J. & Kashiwagi, T., 1978. A scaling study of a corridor subject to a room fire. *Combustion Science and Technology Vol 18*, pp. 1-19.

Tilley, N., Rauwoens, P., Fauconnier, D. & Merci, B., 2013. On the extrapolation of CFD results for smoke and heat control in reduced-scale set-ups to full scale: Atrium configuration. *Fire Safety Journal 59*, pp. 160-165.

U.S. Nuclear Regulator Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES). Electric Power Research Institute (EPRI), 2007. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)*, NUREG-1824, Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Wang, M., Perricone, J., Quintiere, J. G. & Chang, P. C., 2008. Scale modeling of compartment fires for structural fire testing. *Journal of fire protection engineering 18:223*.



## **Bilaga 1 – Litteratursökning**

I början av examensarbetet tillhandahöll Nils Johansson (handledare) litteratur för att arbetet skulle kunna komma igång. Därefter har litteratur inhämtats på två olika sätt. Dels genom att söka i databaser och dels genom att gå igenom referenser i litteraturen som tillhandahölls av Nils Johansson samt litteraturen som söktes fram i databaser.

Databassökningen skedde i LUBsearch som tillhandahålls av Lunds Universitet och låter användaren söka igenom ett flertal olika databaser med en sökning. Sökorden som användes var "scaling fire" vilket resulterade i ungefär 1500 träffar. Urvalsprocessen gick därefter till som beskrivet nedan:

1. Först sållades texter ut efter deras titlar. Ifall en text hade en titel som direkt avslöjade att innehållet inte var relevant ägnades den därför ingen mer tid. Exempel på titlar som sållades bort är "Post-fire bedload sediment delivery across spatial scales in the interior Western United States" och "The self-organized critical forest-fire model on large scales".
2. När det inte gick att sålla bort en artikel baserat på titeln lästes även textens abstract igenom vilket ledde till att ytterligare texter kunde sållas bort.
3. I de fall då även textens abstract verkade vara relevant återstod att gå igenom resten av texten också. De texter som därefter bedömdes vara intressanta och möjliga att använda för rapportens syfte har därefter också använts.

Nedan listas den litteratur som fram genom databassökningen.

Chow, W. K. & Henry, L. H. W., 2008. Scale modeling on natural smoke filling in an atrium. *Heat transfer engineering* 29(1), pp. 76-84.

Tilley, N., Rauwoens, P., Fauconnier, D. & Merci, B., 2013. On the extrapolation of CFD results for smoke and heat control in reduced-scale set-ups to full scale: Atrium configuration. *Fire Safety Journal* 59, pp. 160-165.

Wang, M., Perricone, J., Quintiere, J. G. & Chang, P. C., 2008. Scale modeling of compartment fires for structural fire testing. *Journal of fire protection engineering* 18:223.

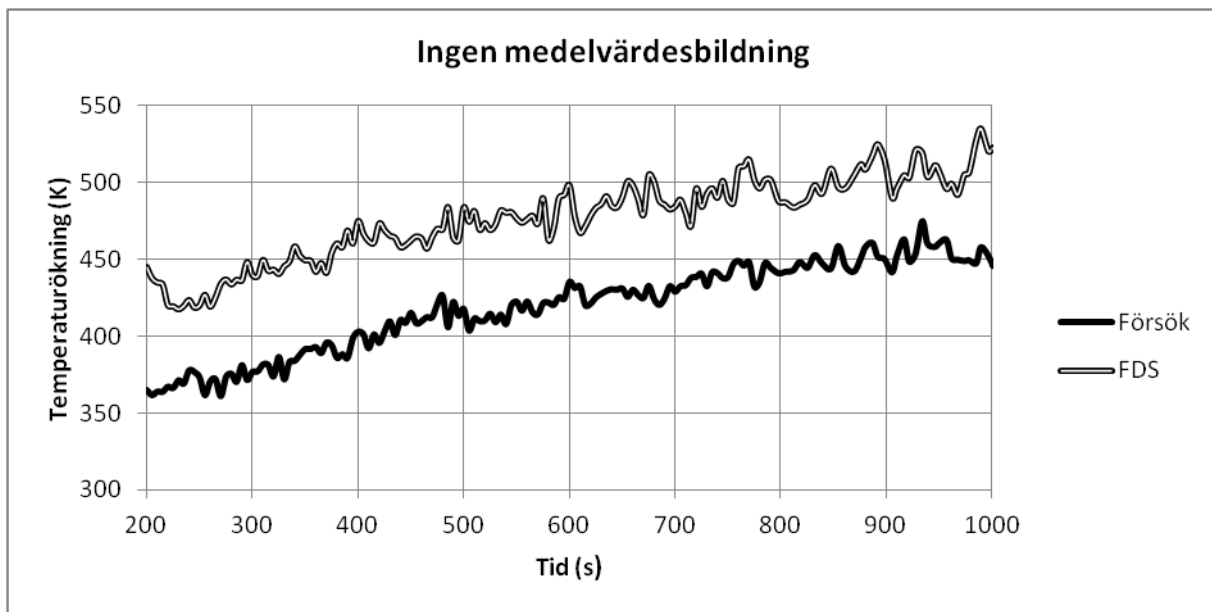
## Bilaga 2 – Medelvärdesbildning och val av s

Vid val av s undersöktes hur valet påverkade det slutgiltiga värdet på SC och vad i kurvorna som faktiskt är intressant att jämföra och hur det i sin tur är beroende av vilken tid medelvärdet bildas över. I tabell och figurer används indata från scenario 1 (både simulering och försök), det angränsande rummet, på höjden 0,46 m. I tabell 10 visas sambandet mellan s och SC.

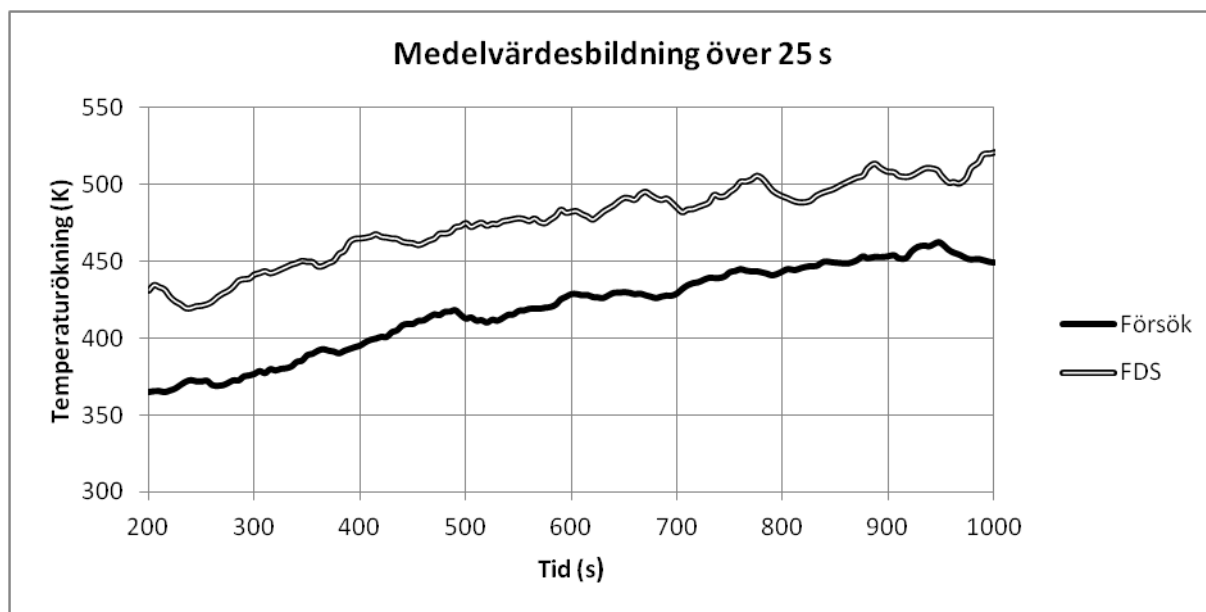
Tabell 8. I tabellen visas värden på SC för olika val av s.

s	SC
5 (25 s)	0,14
10 (50 s)	0,28
20 (100 s)	0,63
30 (150 s)	0,80
40 (200 s)	0,90

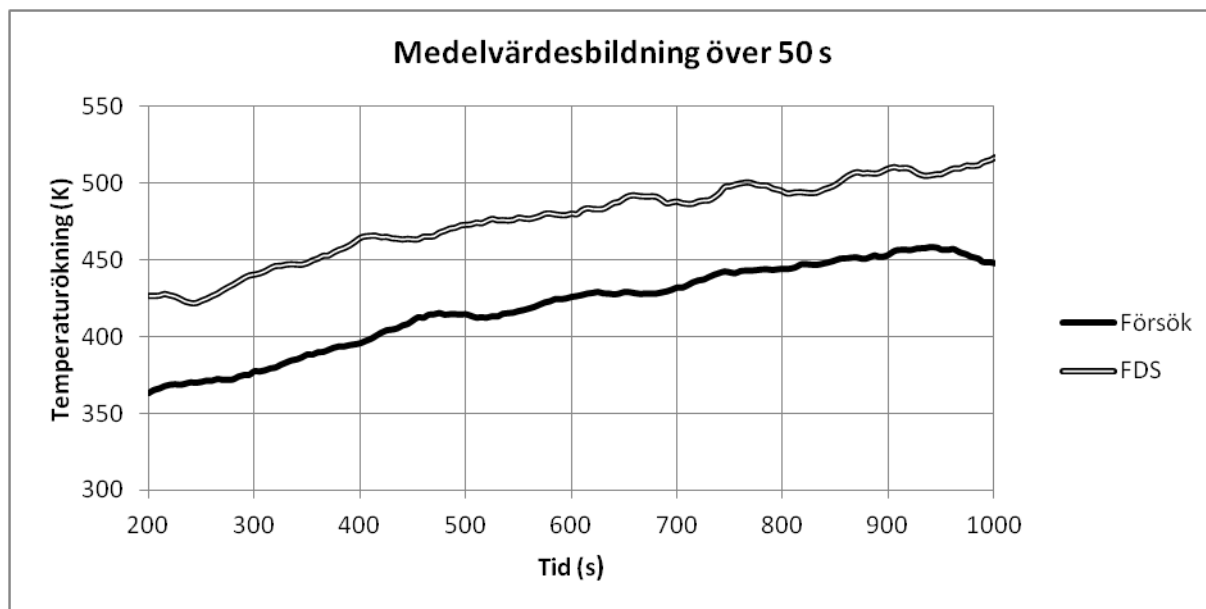
I figur 34 – 40 visas hur kurvorna som jämförs ser ut då olika många värden används vid medelvärdesbildningen.



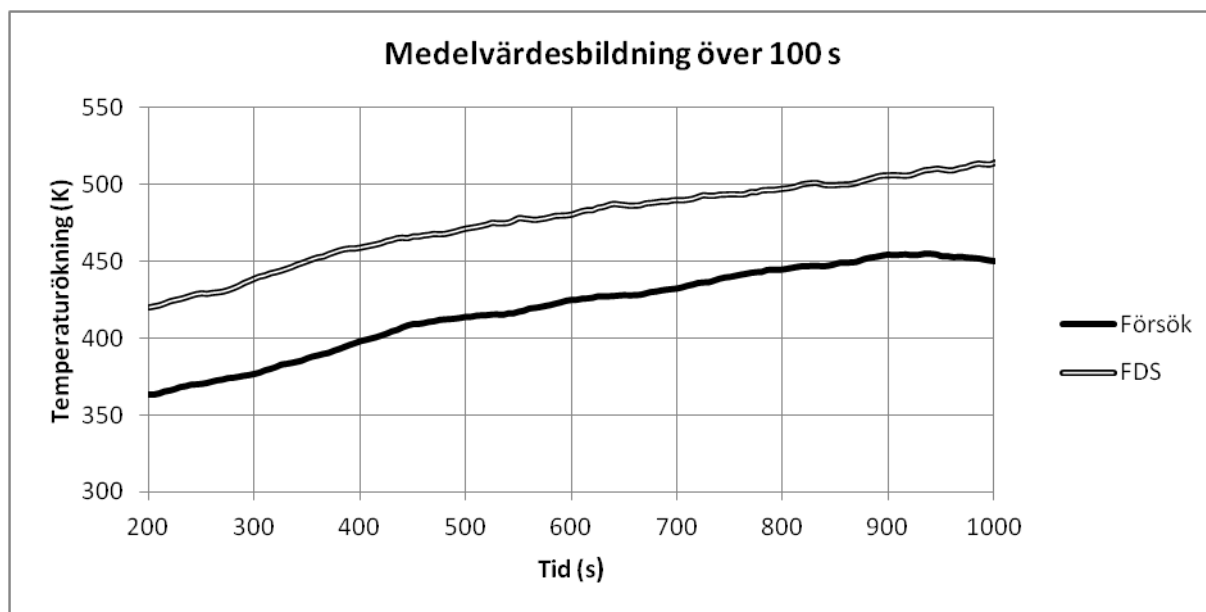
Figur 30. Jämförelse av resultat från försök och FDS utan medelvärdesbildning.



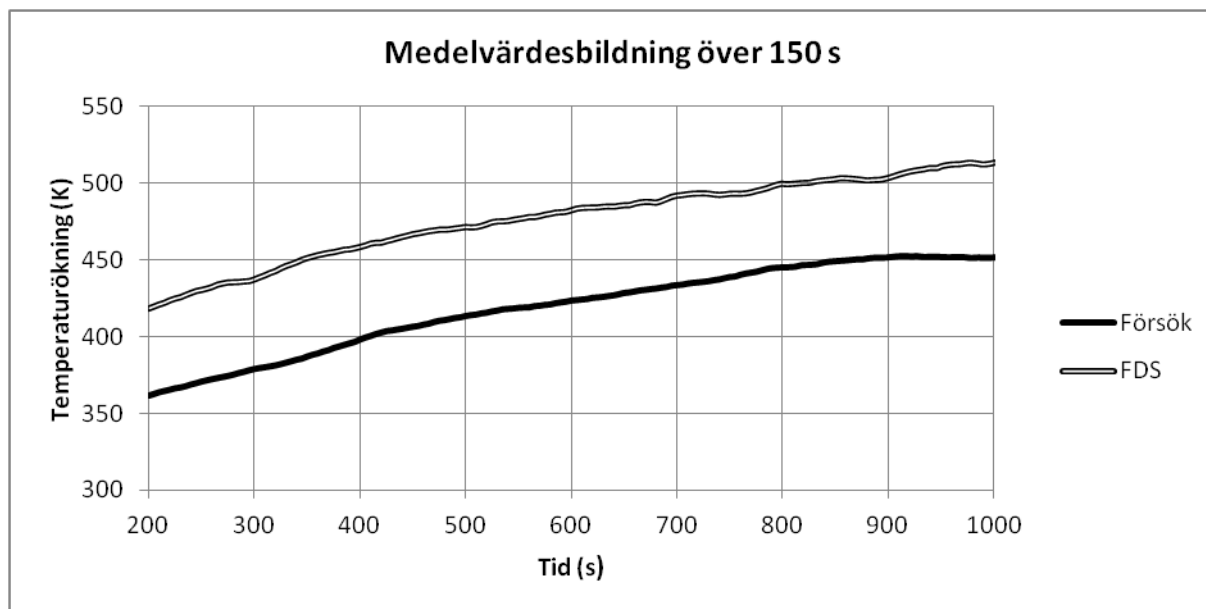
Figur 31 Jämförelse av resultat från försök och FDS med 25 s medelvärdesbildning.



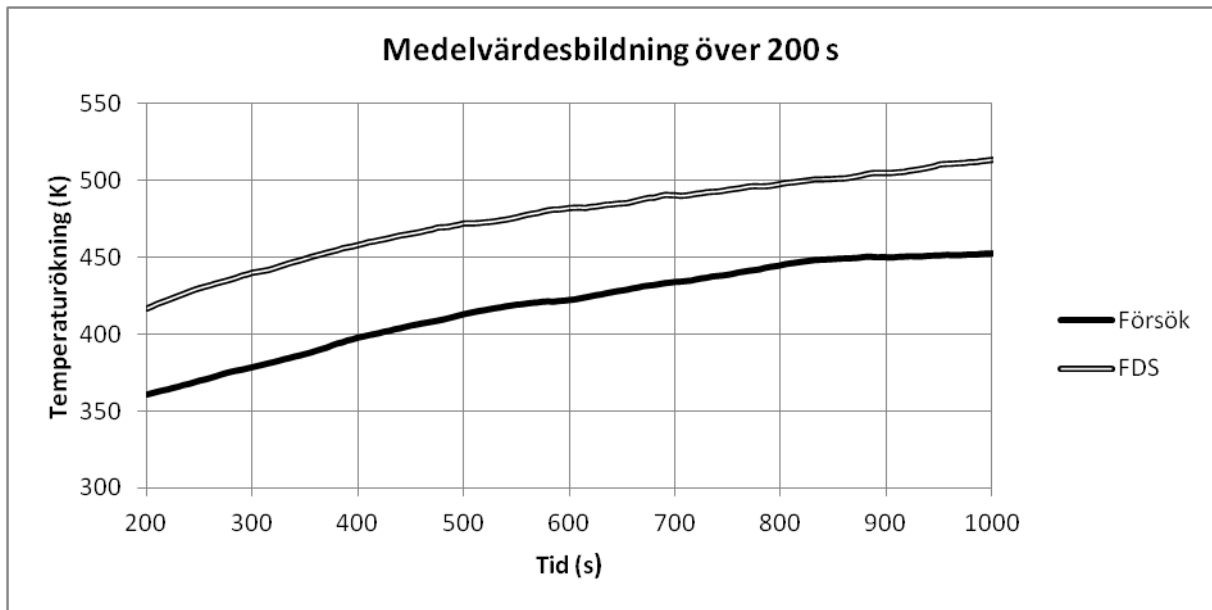
Figur 32 Jämförelse av resultat från försök och FDS med 50 s medelvärdesbildning.



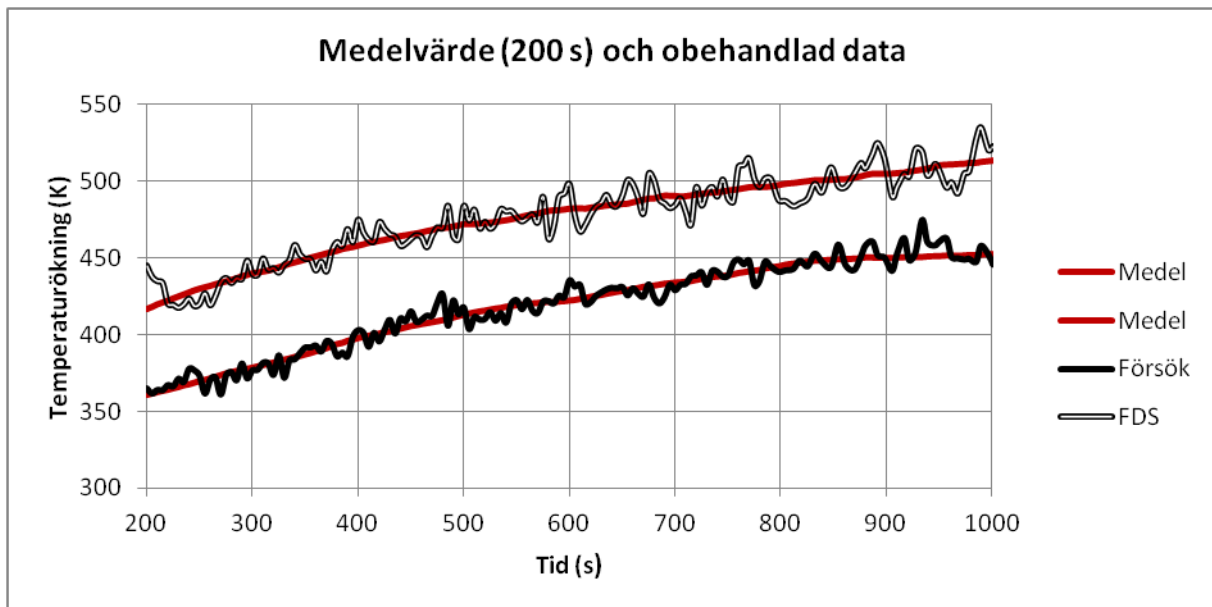
Figur 33. Jämförelse av resultat från försök och FDS med 100 s medelvärdesbildning.



Figur 34. Jämförelse av resultat från försök och FDS med 150 s medelvärdesbildning.



Figur 35 Jämförelse av resultat från försök och FDS med 200 s medelvärdesbildning.



Figur 36 Jämförelse av resultat från försök och FDS där obehandlade resultat visas samtidigt som medelvärdesbildade resultat.

I tabell 8 syns en tydlig skillnad för SC då olika värden på  $s$  används. I figurerna 34 – 40 syns i sin tur att kurvorna i stora drag följer varandra mycket bra, även då ingen medelvärdesbildning har genomförts. Det är vad SC ska mäta, men för att matematiken ska fånga upp huruvida kurvorna följer varandra på ett bra sätt behöver de först jämnas ut, annars styrs jämförelsen istället av när tillfälliga och slumpmässiga fluktuationer sker. Sett till figur SISTA så är det tydligt att de medelvärdesbildade kurvorna fortfarande på ett bra sätt representerar de obehandlade kurvorna. Med en medelvärdesbildning på 200 s antar dessutom SC ett värde som rent intuitivt verkar rimligt. Om  $SC=1$  skulle kurvorna följa varandra perfekt så när som på en konstant, och då kurvorna tydligt följer varandra bedöms  $SC=0,9$  vara en bra beskrivning av det. Utifrån denna argumentation väljs  $s=40$  (200s) till att användas vid beräkning av SC. Samma värde används vid beräkningen för alla kurvor så att en jämförelse dem emellan ska vara så tydlig som möjligt.

### Bilaga 3 - Försöksuppställning

Här redovisas kompletterande information för försöksuppställningen. I tabell 9 visas höjderna som mätningarna i termoelementsträden gjordes på.

**Tabell 9. I tabellen redovisas termoelementens höjder i försöken. Höjderna är angivna i meter (m) över golvnivå (Johansson, et al., 2014).**

TE nr.	Stort rum innerst			Litet rum innerst		
	TE träd 1	TE träd 2	TE träd 3	TE träd 1	TE träd 2	TE träd 3
10	0.57	0.57	-	0.70	-	0.57
9	0.52	0.53	-	0.66	-	0.53
8	0.47	0.46	0.73	0.59	0.73	0.46
7	0.42	0.41	0.63	0.54	0.63	0.41
6	0.36	0.35	0.55	0.48	0.55	0.35
5	0.30	0.29	0.45	0.42	0.45	0.29
4	0.24	0.23	0.33	0.36	0.33	0.23
3	0.19	0.17	0.24	0.30	0.24	0.17
2	0.13	0.11	0.15	0.24	0.15	0.11
1	0.07	0.07	0.06	0.20	0.06	0.07

Figureerna och tabellen är direkt hämtade från Johansson (2014).

I tabell 10 nedan redovisas den materialdata som anges för Promatect-H i Johansson (2014).

**Tabell 10. Materialegenskaper för Promatect-H angivna av Johansson (2014).**

Materialegenskaper	
Densitet	870 kg/m <sup>3</sup>
Värmekapacitet	1130 J/(kg*K)
Värmeledningsförmåga	0.175 W/(m*K)

Johansson anger också att värmeledningsförmågan stiger då materialets temperatur ökar. Han skriver också att då ett stort antal försök genomfördes är det möjligt att materialets egenskaper förändrades.

## Bilaga 4 – Indatafil FDS

I bilagan presenteras indatafiler som är typiska för de simuleringar som har körts. Först presenteras en indatafil för skala 1:4 (scenario 1) och efter den presenteras en indatafil för fullskala (scenario 1).

```
&HEAD CHID='Scen5SM', TITLE='20kW D*/dx=10' /

&MESH ID='MESH1', IJK=72,72,48, XB=-0.64,0.8,0.0,1.44,0.0,0.96, MPI_PROCESS=0 /
&MESH ID='MESH2', IJK=72,72,48, XB=0.8,2.24,0.0,1.44,0.0,0.96, MPI_PROCESS=1 /

&TIME T_END=1200. /

&VENT XB=2.24,2.24,0.0,1.44,0.0,0.96, SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-0.64,-0.64,0.0,1.44,0.0,0.96, SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN' SURF_ID='OPEN' /

---INITIALA FORHALLANDEN---

&MISC TMPA=22. /

---MATERIAL---

&MATL      ID='PROMATECT'
           DENSITY=870.
           SPECIFIC_HEAT=0.92
           CONDUCTIVITY=0.175 /

&SURF      ID='VAGGVANLIG'
           MATL_ID='PROMATECT'
           THICKNESS=0.012
           COLOR='MINT'
           BACKING='VOID' /

&SURF      ID='VAGGMELLAN'
           MATL_ID='PROMATECT'
           THICKNESS=0.024
           COLOR='MINT'
           BACKING='EXPOSED' /

---RUMMEN---

&OBST XB=0.0,0.04,0.0,1.28,0.04,0.84, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 1
&OBST XB=0.04,1.26,1.24,1.28,0.04,0.84, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 2
&OBST XB=0.04,1.26,0.0,0.04,0.04,0.84, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 3
&OBST XB=-0.32,1.28,0.0,1.28,0.0,0.04, SURF_ID='VAGGVANLIG' / GOLV 1
&OBST XB=0.0,1.28,0.0,1.28,0.84,0.88, SURF_ID='VAGGVANLIG' / TAK 1
&OBST XB=1.26,1.28,0.0,1.28,0.64,0.84, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:1
&OBST XB=1.26,1.28,0.0,0.32,0.04,0.64, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:2
&OBST XB=1.26,1.28,0.92,1.28,0.04,0.64, SURF_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:2
&OBST XB=1.26,1.28,0.32,0.92,0.04,0.64, SURF_ID='VAGGMELLAN' / VÄGG 4:4
```

&OBST XB=1.28,2.22,0.28,0.96,0.0,0.04, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / GOLV 2 (LILLA RUMMET)

&OBST XB=1.28,2.22,0.28,0.96,0.64,0.68, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / TAK 2 (LILLA RUMMET)

&OBST XB=2.18,2.22,0.28,0.96,0.04,0.64, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 7 (LILLA RUMMET)

&OBST XB=1.28,2.18,0.28,0.32,0.04,0.64, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 5 (LILLA RUMMET)

&OBST XB=1.28,2.18,0.92,0.96,0.04,0.64, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 6 (LILLA RUMMET)

&HOLE XB=-0.01,0.05,0.52,0.72,0.04,0.56 / YTTRE ÖPPNING

&HOLE XB=1.23,1.29,0.52,0.72,0.04,0.56 / ÖPPNING MELLAN RUM

---BRANDEN---

&REAC FUEL='METHANE'  
SOOT\_YIELD=0.01 /

&SURF ID='BURNER'  
HRRPUA=1400. / GÅ OCH MÄTA METANBRÄNNAREN

&OBST XB=1.68,1.8,0.56,0.68,0.04,0.16,  
SURF\_IDS='BURNER','INERT','INERT'  
COLOR='SLATE GRAY' /

&RADI RADIATIVE\_FRACTION=0.16 / HEAT RADIATION FROM  
FLARES, SELMA E. GUIGARD MFL.

---MATNINGAR---

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.62, /  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.62, /  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.75, /

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=0.62, /  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=0.62, /  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=1.75, /  
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=0.62, /  
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=1.75, /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /  
&BNDF QUANTITY='RADIOMETER' /  
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /

&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.55, ID='V-1HOGST', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.51, ID='V-2', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.47, ID='V-3', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.43, ID='V-4', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.39, ID='V-5', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.35, ID='V-6', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.31, ID='V-7', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.27, ID='V-8', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.23, ID='V-9', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.19, ID='V-10', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.15, ID='V-11', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.11, ID='V-12', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.07, ID='V-13', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.03,0.62,0.03, ID='V-14LAGST', QUANTITY='U-VELOCITY' /



&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.83, ID="TI-1HOGST", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.79, ID="TI-2", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.75, ID="TI-3", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.71, ID="TI-4", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.67, ID="TI-5", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.63, ID="TI-6", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.59, ID="TI-7", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.55, ID="TI-8", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.51, ID="TI-9", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.47, ID="TI-10", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.43, ID="TI-11", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.39, ID="TI-12", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.35, ID="TI-13", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.31, ID="TI-14", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.27, ID="TI-15", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.23, ID="TI-16", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.19, ID="TI-17", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.15, ID="TI-18", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.11, ID="TI-19", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.07, ID="TI-29", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.03, ID="TI-21LAGST", QUANTITY="TEMPERATURE" /

&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.67, ID="TY-1HOGST", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.63, ID="TY-2", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.59, ID="TY-3", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.55, ID="TY-4", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.51, ID="TY-5", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.47, ID="TY-6", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.43, ID="TY-7", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.39, ID="TY-8", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.35, ID="TY-9", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.31, ID="TY-10", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.27, ID="TY-11", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.23, ID="TY-12", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.19, ID="TY-13", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.15, ID="TY-14", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.11, ID="TY-15", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.07, ID="TY-16", QUANTITY="TEMPERATURE" /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.03, ID="TY-17LAGST", QUANTITY="TEMPERATURE" /

&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.83, ID="TCI-1HOGST", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.79, ID="TCI-2", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.75, ID="TCI-3", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.71, ID="TCI-4", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.67, ID="TCI-5", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.63, ID="TCI-6", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.59, ID="TCI-7", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.55, ID="TCI-8", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.51, ID="TCI-9", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.47, ID="TCI-10", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.43, ID="TCI-11", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.39, ID="TCI-12", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.35, ID="TCI-13", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.31, ID="TCI-14", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.27, ID="TCI-15", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.23, ID="TCI-16", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.19, ID="TCI-17", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.15, ID="TCI-18", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.11, ID="TCI-19", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.07, ID="TCI-29", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /  
&DEVC XYZ=1.15,1.15,0.03, ID="TCI-21LAGST", QUANTITY="THERMOCOUPLE" /

```
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.67, ID='TCY-1HOGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.63, ID='TCY-2', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.59, ID='TCY-3', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.55, ID='TCY-4', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.51, ID='TCY-5', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.47, ID='TCY-6', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.43, ID='TCY-7', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.39, ID='TCY-8', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.35, ID='TCY-9', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.31, ID='TCY-10', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.27, ID='TCY-11', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.23, ID='TCY-12', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.19, ID='TCY-13', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.15, ID='TCY-14', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.11, ID='TCY-15', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.07, ID='TCY-16', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=1.37,0.41,0.03, ID='TCY-17LAGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /
```

```
&DEVC XYZ=0.65,0.62,0.04, QUANTITY='RADIOMETER', ID='STRALNING-RADIO', IOR=3. /  
&DEVC XYZ=0.65,0.62,0.04, QUANTITY='NET HEAT FLUX', ID='STRALNING-NETHETFLUX', IOR=3. /  
/  
&TAIL /
```

Indatafil för scenario 1, fullskala.

```
&HEAD CHID='Scen2Fullskala', TITLE='640kW D*/dx=10' /  
  
&MESH ID='MESH1', IJK=64,72,48, XB=-1.44,3.68,0.0,5.76,0.0,3.84, MPI_PROCESS=0 /  
&MESH ID='MESH1', IJK=64,72,48, XB=3.68,8.8,0.0,5.76,0.0,3.84, MPI_PROCESS=1 /  
  
&TIME T_END=2400. /  
  
---INITIALA FORHALLANDEN---  
  
&MISC TMPA=22. /  
  
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT XB=8.8,8.8,0.0,5.76,0.0,3.84, SURF_ID='OPEN' /  
&VENT XB=-1.44,-1.44,0.0,5.76,0.0,3.84, SURF_ID='OPEN' /  
  
---MATERIAL---  
  
&MATL ID='SKALAT'  
DENSITY=1600.  
SPECIFIC_HEAT=0.84  
CONDUCTIVITY=0.834 /  
  
&SURF ID='VAGGVANLIG'  
MATL_ID='SKALAT'  
THICKNESS=0.029  
COLOR='MINT'  
BACKING='VOID' /  
  
&SURF ID='VAGGMELLAN'  
MATL_ID='SKALAT'  
THICKNESS=0.058
```

Oscar Lilja  
*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

COLOR='MINT'  
BACKING='EXPOSED'/

---RUMMEN---

&OBST XB=0.0,0.16,0.0,5.12,0.16,3.36, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 1

&OBST XB=0.16,5.04,4.96,5.12,0.16,3.36, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 2

&OBST XB=0.16,5.04,0.0,0.16,0.16,3.36, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 3

&OBST XB=5.04,5.12,0.0,5.12,2.56,3.36, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:1

&OBST XB=5.04,5.12,0.0,1.28,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:2

&OBST XB=5.04,5.12,3.68,5.12,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 4:3

&OBST XB=5.04,5.12,1.28,3.68,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGMELLAN' / VÄGG 4:4

&OBST XB=0.0,5.12,0.0,5.12,0.0,0.16, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / GOLV 1

&OBST XB=0.0,5.12,0.0,5.12,3.36,3.52, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / TAK 1

&OBST XB=5.12,9.76,1.12,3.84,0.0,0.16, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / GOLV 2

&OBST XB=5.12,8.8,1.12,3.84,2.56,2.72, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / TAK 2

&OBST XB=8.64,8.8,1.28,3.68,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 7

&OBST XB=5.12,8.8,1.12,1.28,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 5

&OBST XB=5.12,8.8,3.68,3.84,0.16,2.56, SURF\_ID='VAGGVANLIG' / VÄGG 6

&HOLE XB=-0.01,0.17,2.08,2.88,0.16,2.08, / YTTRE ÖPPNING

&HOLE XB=4.95,5.13,2.08,2.88,0.16,2.08, / ÖPPNING MELLAN RUM

---BRANDEN---

&REAC FUEL='METHANE'  
SOOT\_YIELD=0.01 /

&SURF ID='BURNER'  
HRRPUA=1563. /

&OBST XB=6.56,7.2,2.24,2.88,0.16,0.64,  
SURF\_IDS='BURNER','INERT','INERT'  
COLOR='SLATE GRAY' /

&RADI RADIATIVE\_FRACTION=0.16 / HEAT RADIATION FROM  
FLARES, SELMA E. GUIGARD MFL.

---MATNINGAR---

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=2.56, /  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=2.56, /  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=6.88, /

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=2.56, /  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=2.56, /

Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=6.88, /  
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=2.56, /  
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=6.88, /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /  
&BNDF QUANTITY='RADIOMETER' /  
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /

&DEVC XYZ=0.05,2.48,2.2, ID='V-1HOGST', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,2.04, ID='V-2', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.88, ID='V-3', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.72, ID='V-4', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.56, ID='V-5', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.4, ID='V-6', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.24, ID='V-7', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,1.08, ID='V-8', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.92, ID='V-9', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.76, ID='V-10', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.60, ID='V-11', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.44, ID='V-12', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.28, ID='V-13', QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=0.05,2.48,0.12, ID='V-14LAGST', QUANTITY='U-VELOCITY' /

&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.32, ID='TI-1HOGST', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.16, ID='TI-2', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.0, ID='TI-3', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.84, ID='TI-4', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.68, ID='TI-5', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.52, ID='TI-6', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.36, ID='TI-7', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.2, ID='TI-8', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.04, ID='TI-9', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.88, ID='TI-10', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.72, ID='TI-11', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.56, ID='TI-12', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.4, ID='TI-13', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.24, ID='TI-14', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.08, ID='TI-15', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.92, ID='TI-16', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.76, ID='TI-17', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.60, ID='TI-18', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.44, ID='TI-19', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.28, ID='TI-20', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.12, ID='TI-21LAGST', QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.32, ID='TCI-1HOGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.16, ID='TCI-2', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,3.0, ID='TCI-3', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.84, ID='TCI-4', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.68, ID='TCI-5', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.52, ID='TCI-6', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.36, ID='TCI-7', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.2, ID='TCI-8', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,2.04, ID='TCI-9', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.88, ID='TCI-10', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.72, ID='TCI-11', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.56, ID='TCI-12', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.4, ID='TCI-13', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.24, ID='TCI-14', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,1.08, ID='TCI-15', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.92, ID='TCI-16', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.76, ID='TCI-17', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /

Oscar Lilja

*Osäkerhet vid skalning av brandtekniska försök*

&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.60, ID='TCI-18', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.44, ID='TCI-19', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.28, ID='TCI-29', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=4.6,4.6,0.12, ID='TCI-21LAGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /

&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.68, ID='TY-1HOGST', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.52, ID='TY-2', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.36, ID='TY-3', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.2, ID='TY-4', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.04, ID='TY-5', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.88, ID='TY-6', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.72, ID='TY-7', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.56, ID='TY-8', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.4, ID='TY-9', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.24, ID='TY-10', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.08, ID='TY-11', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.92, ID='TY-12', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.76, ID='TY-13', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.60, ID='TY-14', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.44, ID='TY-15', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.28, ID='TY-16', QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.12, ID='TY-17LAGST', QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.68, ID='TCY-1HOGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.52, ID='TCY-2', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.36, ID='TCY-3', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.2, ID='TCY-4', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,2.04, ID='TCY-5', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.88, ID='TCY-6', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.72, ID='TCY-7', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.56, ID='TCY-8', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.4, ID='TCY-9', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.24, ID='TCY-10', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,1.08, ID='TCY-11', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.92, ID='TCY-12', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.76, ID='TCY-13', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.60, ID='TCY-14', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.44, ID='TCY-15', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.28, ID='TCY-16', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /  
&DEVC XYZ=5.48,1.64,0.12, ID='TCY-17LAGST', QUANTITY='THERMOCOUPLE' /

&DEVC XYZ=2.56,2.48,0.16, QUANTITY='RADIOMETER', ID='STRALNING-RADIO', IOR=3. /  
&DEVC XYZ=2.56,2.48,0.16, QUANTITY='NET HEAT FLUX', ID='STRALNING-NETHETFLUX', IOR=3. /

&TAIL /

## Bilaga 5 – Skalningsberäkningar

Här kommer omvandlingen av variabler ske från skala 1:4 till skala 1:1 eftersom att försök i skala 1:4 redan har genomförts och information behövs för att kunna bygga upp försök/simuleringar i fullskala. Principen för hur beräkningarna utförs skulle dock vara densamma i fall skalningen sker från fullskala till skala 1:4.

Först skalas effektutvecklingen,  $\Pi_2$  ( $Q^*$ ).

$$1. \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g} \cdot l^2} \right)_m = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g} \cdot l^2} \right)_f$$

Efter att uttrycken likställts med varandra kan de variabler som kommer att vara likadana i både modell och fullskala strykas, vilket ger:

$$2. \frac{Q_m}{l_m^2} = \frac{Q_f}{l_f^2}$$

När bara det som skiljer uttrycken åt för de båda skalorna finns kvar, i det här fallet effektutvecklingen och den karakteristiska längden, så går det att lösa ut informationen som söktes från början. I det här fallet handlar det om effektutvecklingen i fullskala:

$$3. Q_f = Q_m \cdot \left( \frac{l_f}{l_m} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$\left( \frac{l_f}{l_m} \right)^{\frac{5}{2}}$  kan ses som en skalfaktor och den presenteras i tabell 3 i avsnitt 4.1. De båda längderna helt enkelt är skalförhållandet, alltså 1 och 4, vilket innebär att skalfaktorn här blir 32.

Skalningen för att ta fram väggmaterialets egenskaper går till på samma sätt och därför presenteras bara det sista steget. Skalningen utgår från  $\Pi_5$ . En skillnad att  $k \cdot \rho \cdot c$  ses som en enhet vid beräkningen och att de därför måste bestämmas individuellt i ett senare skede.

$$(k \cdot \rho \cdot c)_f = (k \cdot \rho \cdot c)_m \cdot \left( \frac{l_f}{l_m} \right)^{3/2}$$

De individuella komponenterna i  $k \cdot \rho \cdot c$  bestämdes genom att försöka anpassa värdena så att riktigt material är representerat, trots att vilken kombination som helst skulle kunna väljas då värdena bara ska användas i en simulering.  $k$ ,  $\rho$  och  $c$  valdes därför för att likna tegel, men  $k$  anpassades något för att skalningen skulle bli så riktig som möjligt. Värdet på  $k$ , och  $c$  för tegel hämtades i (Karlsson & Quintiere, 2000).

Då tjockleken för rummets omslutningar bestäms användes  $\Pi_8$ . Tillvägagångssättet är detsamma, dock blir fler komponenter än längder inblandande i skalfaktorn. Hur skalningen ser ut visas här:

$$\delta_f = \delta_m \cdot \left( \frac{l_f}{l_m} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\left( \frac{\rho \cdot c}{k} \right)_m}{\left( \frac{\rho \cdot c}{k} \right)_f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Där  $k$ , och  $c$  först har tagits fram från  $\Pi_5$ .