

# **Flamspridningsberäkningar i FDS5**

**– framtagning av indataparametrar  
samt utvärdering vid olika storleks-  
förhållanden**

**Leif Staffansson**

---

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

**Brandteknik och Riskhantering  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet**

**Report 5313, Lund 2009**



**Flamspridningsberäkningar i FDS5 – framtagning av  
indataparametrar samt utvärdering vid olika storleks-  
förhållanden**

**Leif Staffansson**

**Lund 2009**

**Titel**

Flamspridningsberäkningar i FDS5 – framtagning av indataparametrar samt utvärdering vid olika storleksförhållanden.

**Title**

Flame spread modeling in FDS5 – determination of input parameters and evaluation at different scales.

**Författare**

Leif Staffansson.

**Report 5313**

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB-5313-SE

Number of pages: 115

Illustrations: Leif Staffansson.

**Keywords**

Flame spread modeling, flame spread, Fire Dynamics Simulator, FDS, fire simulation, Gpyro, CFD-simulation, CFD-modeling, design fire, fire scenario.

**Sökord**

Flamspridning, flamspridningsberäkningar, Fire Dynamics Simulator, FDS, brand-simulering, Gpyro, CFD-simulering, dimensionerande brand, brandscenarier.

**Abstract**

The CFD-program Fire Dynamics Simulator 5, FDS5, can model flame spread. This report studies if flame spread modeling can be used for creating a design fire when using performance-based fire safety design of a building. From cone calorimeter data the computer program Gpyro was used to determine input parameters for FDS5 for five different wood materials. The input parameters were then evaluated in two different types of flame spread experiments. In the evaluation the simulations models in FDS5 were identified as highly sensitive to grid size and small changes in the simulation setup had great affect on flame spread.

**Disclaimer**

Författaren ansvarar för innehållet i rapporten.

© Copyright: Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet, Lund 2009

---

Brandteknik och Riskhantering  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

brand@brand.lth.se  
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60  
Telefax: 046 - 222 46 12

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

brand@brand.lth.se  
<http://www.brand.lth.se/english>

Telephone: +46 46 222 73 60  
Fax: +46 46 222 46 12

# Förord

---

Denna rapport är en del av arbetet i kursen *VBRM01 Examensarbete i brandteknik* vilken omfattar 22,5 hp. Arbetet utfördes vid *Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering* vid Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Svedala Räddningstjänst.

Det huvudsakliga arbetet med denna rapport genomfördes sommaren och hösten 2009. Under arbetet var ett antal personer till stor hjälp och författaren vill därför tacka följande personer:

Patrick van Hees, professor vid *Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering*, för ovärderlig handledning och givande kommentarer under arbetets gång.

Mikael Jönsson, Stf. räddningschef Svedala Räddningstjänst, för handledning och hjälp vid besök på objektet.

Örjan Thorné, räddningschef Svedala Räddningstjänst, för hjälp med objekt till mitt examensarbete.

Christer Andersson, ägare Bökebergs Arena, för hjälp vid besök på objektet.

Thor Heijkenskjöld, arkitekt, för hjälp med ritningar på objektet.

Chris Lautenberger, postdoktorsforskare vid Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, för hjälp med programmet Gpyro.

Hanna Persson, civilingenjör i kemiteknik vid Höganäs AB, för dina värdefulla kommentarer och feedback när jag behövde bolla idéer om upplägget av min rapport.

Lund, november 2009.



---

Leif Staffansson



# Sammanfattning

---

Bakgrunden till denna rapport är att det i CFD-programmet Fire Dynamics Simulator 5, FDS5, finns en möjlighet att beräkna flamspridning. Detta ger en möjlighet att genom programmet ta fram en dimensionerande brand, vilken skulle kunna användas vid en analytisk dimensionering av det byggnadstekniska brandskyddet i en byggnad. Syftet med rapporten är att undersöka hur flamspridningsberäkningar i FDS5 skulle kunna användas i detta hänseende.

Arbetet i rapporten avgränsades genom att endast undersöka möjligheten till att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand hos ett befintligt objekt, Bökebergs Arena i Svedala kommun.

Först identifierades dimensionerande brandscenarier för objektet och dimensionerande bränder togs fram med en metod utan flamspridningsberäkningar. Därefter användes programmet Gpyro för att ta fram materialparametrar för fem olika trämaterial. Materialparametrarnas egenskaper i FDS5 undersöktes därefter i en modell av konkalorimetern (ISO5660) och simuleringarna jämfördes med experimentdata. Gpyro visades vara kapabel att ta fram materialparametrar som i FDS5 gav ett acceptabelt överrensstämmande resultat med experimentdata.

De framtagna materialparametrarna användes sedan vid simuleringar i FDS5 av två olika flamspridningsexperiment; ett flamspridningsexperiment av SP samt ISO 9705 Room-Corner test. Vid simuleringarna identifierades att cellstorleken hade stor betydelse för resultatet och inget egentligt grid-oberoende uppnåddes med de cellstorlekar som använts. Cellstorlekarna varierades mellan 1 cm till 4 cm för flamspridningsexperimentet av SP och mellan 4 cm till 32 cm för ISO 9705 Room-Corner test. Simuleringarna visade även att flamspridningen beror mycket på vilken simuleringsuppställning som använts. Detta visades särskilt i flamspridningsexperimentet av SP där en ändring av brännaren eller strålningsfraktionen påverkade flamspridningen avsevärt.

Att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand kräver höga krav på utvärdering och validering av materialparametrar och simuleringsuppställning. Förslag på en lämplig arbetsmetod redovisas i rapporten. För de simuleringar som gjorts vore det omöjligt att med enbart FDS5 kunna förutspå hur flamspridningen skulle ske i verkligheten. Att använda FDS5 för att ta fram en dimensionerande brand för Bökebergs Arena ansågs därför inte lämpligt. Således genomfördes inte några flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand vid Bökebergs Arena.





# Summary

---

In the CFD-program Fire Dynamics Simulator 5, FDS5, it is possible to model flame spread. This could possibly be used for creating a design fire when using performance-based fire safety design of a building. The purpose of this report is to examine how flame spread modeling in FDS5 could be used for creating a design fire.

A limitation made for this report were to only examine the possibility to use flame spread modeling for creating a design fire at an existing object, Bökebergs Arena in Svedala.

At first design fire scenarios for the object were identified and design fires were created without using flame spread modeling. After that the computer program Gpyro was used for determine input parameters for FDS5 for five different wood materials. The input parameters were then evaluated in a model of the cone calorimeter (ISO5660) and the simulations were compared to experimental data. Gpyro was capable of determine input parameters that, when used in FDS5, correspond reasonable well with experimental data.

The input parameters were then used in simulations in FDS5 of two different flame spread experiments; a flame spread experiment made by SP and the ISO 9705 Room-Corner test. From the simulations the flame spread was identified to be very dependent of grid size and grid-independence was not achieved with the grid sizes that were used. The grid sizes were changed between 0.1m and 0.4m for the flame spread experiment made by SP and between 0.4m and 0.32m for ISO 9705 Room-Corner test. The simulations also show that flame spread is very dependent of how the simulation model is setup. This was especially shown in the simulations of the flame spread experiment made by SP, where a small change of the burner or the radiative fraction significantly changed the flame spread.

To be able to use flame spread modeling for creating a design fire demands careful evaluation and validation of input parameters and the simulation model. A suitable method for this purpose is being suggested in the report. For the simulations made in this report it would be impossible to make blind prediction of how the flame spread would happen in the real scenarios. Thus using flame spread modeling in FDS5 for creating a design fire for the chosen design fire scenarios would be impossible. Flame spread modeling has therefore not been used for creating a design fire for the design fire scenarios.



# Innehållsförteckning

---

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Litteraturoversikt	2
1.2	Syfte	4
1.3	Mål	4
1.4	Frågeställning	4
1.5	Metod	5
1.6	Avgränsningar	6
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>7</b>
2.1	Modellering av brandförlopp	7
2.1.1	Computational Fluid Dynamics (CFD)	7
2.1.2	Fire Dynamics Simulator (FDS)	8
2.2	Flamspridning	9
2.2.1	Antändningsteori	9
2.2.2	Faktorer som påverkar flamspridning	10
2.2.3	Modellering av flamspridning	14
2.3	Gpyro	14
2.3.1	Genetisk algoritm	15
<b>3</b>	<b>Objektsbeskrivning</b>	<b>17</b>
3.1	Byggnadsbeskrivning	17
3.2	Verksamhetsbeskrivning	19
<b>4</b>	<b>Dimensionerande brand</b>	<b>21</b>
4.1	Nomenklatur	21
4.2	Bökebergs Arena	21
4.2.1	Brand i monter	22
4.2.2	Brand på scen	22
4.2.3	Effektutvecklingskurvor	24
<b>5</b>	<b>Simuleringar utan flamspridningsberäkningar</b>	<b>25</b>
5.1	Simuleringsuppställning	25
5.2	Mesh-indelning	27
<b>6</b>	<b>Simuleringar med flamspridningsberäkningar</b>	<b>29</b>
6.1	Gpyro och Gpyro Property Estimation Program	29
6.1.1	Experimentdata	29

6.1.2	Inställningar Gpyro Property Estimation Program.....	31
6.1.3	Modell av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5.....	35
<b>6.2</b>	<b>Simulering av flamspridningsexperiment SP .....</b>	<b>35</b>
<b>6.3</b>	<b>Simulering av ISO 9705 Room-corner test .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>39</b>
<b>7.1</b>	<b>Simulering utan flamspridningsberäkningar .....</b>	<b>39</b>
7.1.1	Brand i monter .....	39
7.1.2	Brand på scen.....	40
<b>7.2</b>	<b>Gpyro Property Estimation Program.....</b>	<b>41</b>
7.2.1	Test av parallellsimulering.....	41
7.2.2	LDF-skiva .....	42
7.2.3	MDF-skiva .....	42
7.2.4	Spånskiva.....	43
7.2.5	Plywood.....	44
7.2.6	Gran.....	45
<b>7.3</b>	<b>Konkalorimeter (ISO5660) FDS5 .....</b>	<b>46</b>
7.3.1	LDF-skiva .....	46
7.3.2	MDF-skiva .....	46
7.3.3	Spånskiva.....	47
7.3.4	Plywood.....	47
7.3.5	Gran.....	48
<b>7.4</b>	<b>Simulering av flamspridningsexperiment SP .....</b>	<b>48</b>
7.4.1	LDF-skiva .....	50
7.4.2	Spånskiva.....	52
<b>7.5</b>	<b>Simulering av ISO 9705 Room-corner test .....</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion och analys.....</b>	<b>55</b>
<b>8.1</b>	<b>Simulering utan flamspridningsberäkningar, Bökebergs Arena .....</b>	<b>55</b>
8.1.1	Grid-oberoende.....	55
<b>8.2</b>	<b>Gpyro och Gpyro Property Estimation Program.....</b>	<b>56</b>
8.2.1	Koppling till FDS5 .....	57
8.2.2	Felkällor experiment .....	59
<b>8.3</b>	<b>Simulering av flamspridningsexperiment SP .....</b>	<b>59</b>
<b>8.4</b>	<b>Simulering av ISO 9705 Room-corner test .....</b>	<b>61</b>
<b>8.5</b>	<b>Sammanfattning av diskussion och analys.....</b>	<b>62</b>
8.5.1	Bökebergs Arena.....	62

8.5.2	Gpyro och Gpyro Property Estimation Program.....	62
8.5.3	Flamspridningsberäkningar i FDS5.....	63
9	Slutsatser.....	65
9.1	Bökebergs Arena.....	65
9.2	Gpyro och Gpyro Property Estimation Program.....	65
9.3	Flamspridningsberäkningar i FDS5.....	65
10	Förslag till framtida arbeten .....	67
11	Källförteckning.....	69
Bilaga A	Fire Dynamics Simulator.....	I
Bilaga B	Simuleringsuppställning Bökebergs Arena .....	VII
Bilaga C	Inställningar Gpyro och Gpyro Property Estimation Program.....	XIII
Bilaga D	Konkalorimeter (ISO5660) FDS5 .....	XVII
Bilaga E	Indatafiler flamspridningssimuleringar .....	XIX
Bilaga F	Materialparametrar FDS5.....	XXV



# 1 Inledning

---

Genom att antalet komplexa byggnader som inte följer en traditionell utformning blivit allt vanligare, används analytisk dimensionering av det byggnadstekniska brandskyddet allt oftare. Detta har i sin tur ökat användningen av datorbaserade modeller för att beräkna brandgasspridning och värmetransport inom en byggnad. [1]

En idag vanlig metod för att göra en analytisk dimensionering är att göra en *deterministisk analys*, även kallad *scenarioanalys*. Antalet möjliga brandscenarier i en byggnad är i det närmaste oändligt många, därför undersöks vid en deterministisk analys några för byggnaden representativa brandscenarier. Dessa brandscenarier brukar kallas för *dimensionerande brandscenarier* och förhoppningen är att dessa ska kunna representera alla möjliga scenarier i byggnaden. Vid valet av dimensionerande brandscenarier skall de möjliga scenarierna värderas utifrån sannolikhet att de uppkommer och möjliga konsekvenser av dessa. De scenarier som har både relativt hög sannolikhet och konsekvens väljs sedan för att analyseras vidare. [2]

En del av att ta fram dimensionerande brandscenarier är att bestämma en eller flera *dimensionerande bränder*. Beroende på vad som skall dimensioneras, kan olika dimensionerande bränder tänkas användas. Om dimensioneringen syftar till att kontrollera antingen byggnadens hållfasthet vid brand, utrymningssäkerheten eller dimensionering av ett släcksystem kan olika dimensionerande bränder vara lämpliga. För byggnadshållfastheten är det ofta relativt långa brandförlopp som är intressanta, där branden övergått till en fullt utvecklad brand och temperaturerna i brandgaserna är höga under lång tid. För sådana fall beskrivs ofta den dimensionerande branden med en temperatur-tidskurva, där ventilationsförhållanden och totala mängden tillgängligt bränsle i byggnaden är av stor betydelse. Vid undersökning av utrymningssäkerheten är det istället det inledande skedet av brandförloppet som är av störst betydelse och den dimensionerande branden beskrivs ofta med en effektutveckling i förhållande till tiden. [1]

Att ta fram en dimensionerande brand uttryckt som en effektutveckling i förhållande till tiden kan göras genom flera olika metoder. Ett sätt är att för tillväxtfasen beskriva brandens effektutveckling enligt  $\alpha t^2$ -modellen, där branden följer sambandet:

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^2 \text{ [kW]} \quad (1.1)$$

där  $\alpha$  är en tillväxtkonstant, ofta angiven i kW/s<sup>2</sup>, som det för vissa typer av möbler och byggnadstyper finns tabellerade värden för och  $t$  är tiden i sekunder. Eventuellt bedöms brandens effektutveckling växa upp till ett visst konstant värde, där branden antingen blir ventilationskontrollerad eller att allt brännbart material redan brinner. Denna konstanta fas kan sedan bedömas brinna för en viss tid innan brandens effektutveckling därefter minskar, den så kallade avsvalningsfasen. [1]

En annan metod för att beskriva den dimensionerande branden är att lägga samman mätningar av effektutvecklingen hos olika material och möbler till en enda effektutvecklingskurva [3]. Mätningarna kan vara gjorda i antingen små- eller fullskala på mer eller mindre liknande material och möbler som kan tänkas finnas i byggnaden. Det är därför upp till användaren att bedöma hur väl dessa försök representerar de förhållanden som finns i byggnaden. Eventuellt måste omskalning göras för att kompensera för olika storlekar på material, rumsförhållanden etcetera.

Bakgrunden till denna rapport är att det i CFD-programmet Fire Dynamics Simulator 5 [4], FDS5, finns en möjlighet att beräkna flamspridning, vilket ger en möjlighet att genom programmet ta fram en dimensionerande brand. Istället för att användaren definierar branden kan programmet simulera hela brandförloppet med tillhörande brandgasspridning. Detta kräver dock tillgång till en del materialparametrar. Eftersom bränder och framförallt flamspridning hos ett material är ett väldigt komplext fenomen, samt att materialparametrar kan vara svåra att få tag på, är det rimligt att ifrågasätta hur bra dessa flamspridningsmodeller kan skildra dessa fenomen. Då den dimensionerande branden är en viktig parameter för den analytiska dimensioneringen är det därför viktigt att undersöka lämpligheten i användandet av flamspridningsmodeller.

För att antalet möjliga scenarier och variabler inte skall bli för många avgränsas arbetet genom att endast undersöka möjligheten till att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand hos ett befintligt objekt. Objektet är valt till Bökebergs Arena i Svedala kommun. För detta objekt har utrymningsmöjligheterna dimensionerats analytiskt. Därför ligger fokuset i denna rapport på att undersöka möjligheterna att få fram en dimensionerande brand som kan användas för detta objekt genom att använda flamspridningsberäkningar i FDS5. Dessutom tas en dimensionerande brand fram genom en enklare metod, utan flamspridningsberäkningar, för att kunna jämföra detta med resultatet från användningen av flamspridningsberäkningar.

## 1.1 Litteraturoversikt

Flertalet publikationer angående flamspridningsberäkningar i FDS har skrivits. Kwon [5] jämför i sin rapport simuleringar av uppåtgående flamspridning i FDS version 4 på en PMMA panel med experimentella data och empiriska korrelationer. Även Hietaniemi, Hostikka och Vaari [6] jämför flertalet simuleringar av flamspridning i FDS4 med data från experiment. I båda dessa rapporter noteras stora variationer i hur väl FDS4 stämmer överens med experimentella data. Typ av brännbart material och typ av experiment visar sig ha stor betydelse för hur väl FDS4 kan prediktera den verkliga flamspridningen. Ho [7] konstaterar i sin rapport, som undersöker möjligheten att simulera flamspridningen i FDS4 vid ett LIFT-test<sup>1</sup>, att material som förkolnar är särskilt svåra att simulera då bildandet av ett kollager drastiskt ändrar egenskaperna i materialet. Ho konstaterar även att flamspridningen i FDS4 är väldigt känsligt för storleken på cellerna och en mindre cellstorlek ger inte nödvändigtvis bättre resultat.

---

<sup>1</sup> LIFT = Lateral Ignition and Flame spread Test. En standardiserad testmetod enligt ASTM E1321 [43] för att bestämma ett materials antändnings- och flamspridningsegenskaper.



Två rapporter som behandlar flamspridning i FDS5 är skrivna av Hjohlman, Försth och Axelsson [3] samt Hjohlman och Andersson [8]. I Hjohlman och Andersson [8] simuleras flamspridning för textilmaterial och en känslighetsanalys för cellstorlek samt ett antal materialparametrar genomförs. Bland annat identifieras stor känslighet för cellstorleken. Hjohlman, Försth och Axelsson [3] undersöker tre olika metoder att beskriva en dimensionerande brand för en tågagn, som sedan jämförs mot data från experiment. Metoderna var (1) val av en  $\alpha t^2$ -kurva, (2) en summering av effektutvecklingsmätningar av de ingående materialen samt (3) en flamspridningsberäkning i FDS5. För flamspridningsberäkningen i FDS5 konstaterades att användandet av materialdata härledda från småskaleförsök inte gav en flamspridning i FDS5 som helt stämde med fullskaleförsök. Om den termiska ledningsförmågan hos sätet i tågagnen justerades något, återgav FDS5 flamspridningen i fullskaleförsöket bättre. Detta kan vara en indikation på att materialdata härledda från småskaleförsök inte tillfredsställande beskriver materialegenskaperna i fullskala. Även i denna rapport konstateras känsligheten för val av cellstorlek.

Att få fram korrekt materialdata vilka kan användas i flamspridningsberäkningar i CFD-program är ett problem som påpekas i en rad rapporter [6; 9; 10; 11]. Ofta använda materialtestmetoder såsom konkalorimetern, LIFT och Room-Corner Test ger inte direkt de materialparametrar som behövs för flamspridningsberäkningar. Flertalet metoder för att beräkna materialparametrar ur sådana testmetoder finns [12; 13], dock är dessa oftast inte framtagna i syfte att användas för flamspridningsberäkningar i CFD-program. Därför ger dessa metoder sällan alla parametrar som behövs för att beräkna flamspridning i FDS utan att användaren får göra vissa bedömningar själv.

Lautenberger, Rein och Fernandez-Pello [9] härleder en metod för att relativt snabbt beräkna materialparametrar från småskaleförsök som senare kan användas för den pyrolysmo­dell som FDS4 använder. Metoden går ut på en optimeringsalgoritm kallad Genetic Algorithm, GA, som beräknar materialparametrar vilka ger ett resultat från pyrolysmodellen som överensstämmer med experimentdata. Materialparametrarna behöver således inte vara materialets verkliga parametrar utan de beräknade parametrarna garanterar endast att ge ett visst resultat i den använda pyrolysmodellen.

Lautenberger [14] har utvecklat en generell pyrolysmo­dell för fasta material, Gpyro, som finns som öppen källkod på <http://code.google.com/p/gpyro>. Programpaketet ger även en möjlighet att utifrån experimentdata i småskaleförsök beräkna materialparameter med hjälp av samma GA som används i Lautenberger, Rein och Fernandez-Pello [9]. Gpyro innehåller väldigt detaljerade pyrolysmo­deller för fasta, brännbara material men även en funktion att använda exakt samma pyrolysmo­dell som används i FDS5. På det viset kan Gpyro användas för att få fram materialparametrar som ger ett visst bestämt resultat i FDS5.

Även Matala [10] har använt GA i sin rapport för att bestämma reaktionsparametrar för fasta, brännbara material i FDS5. Matalas program PyroPlot, som är gjord för att användas med programmet MATLAB, finns som öppen källkod på <http://code.google.com/p/pyroplot>.

Utifrån litteraturöversikten kan det konstateras att flamspridningsberäkningar i FDS4 och FDS5 ofta visar stor känslighet för valet av cellstorlek i simuleringarna. Dessutom visar litteraturöversikten på bristande tillgång till korrekta materialparametrar som kan användas för flamspridningsberäkningar. Optimeringsalgoritmen GA skulle kunna vara en metod för att få fram materialparametrar utifrån experimentdata. Där verkar Gpyro extra lovande eftersom den förutom FDS5s pyrolysmo­dell även innehåller flera egna pyrolysmo­deller. Känsligheten för val av cellstorlek och att ta fram materialparametrar med hjälp av Gpyro blir därför en del av vad som ska undersökas i denna rapport.

## 1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka hur flamspridningsberäkningar i FDS5 skulle kunna användas i ett verkligt fall, Bökebergs Arena, för att få fram en dimensionerande brand vid en analytisk dimensionering. Dessutom är syftet att undersöka känsligheten hos FDS5 i valet av indata och simuleringsuppställning samt att se om detta påverkar lämpligheten i användandet av flamspridningsberäkningar vid analytisk dimensionering.

## 1.3 Mål

Målet med rapporten är att undersöka vilka indata som krävs för att använda flamspridningsberäkningar i FDS5, se hur valet av dessa påverkar resultatet samt att jämföra resultatet från flamspridningssimuleringar med simuleringar där en enklare metod av den dimensionerande branden använts. Målet är även att ge förslag på metoder för att ta fram materialparametrar från experimentdata, som senare kan användas för flamspridningsberäkningar i FDS5.

## 1.4 Frågeställning

Några av de frågor som rapporten syftar till att svara på sammanställs nedan:

- Vilka indata krävs för att kunna använda flamspridningsberäkningar i FDS5?
- Hur känslig är modellen för storleken på cellerna?
- Hur känslig är modellen för valet av materialparametrar?
- Hur hittar man enklast materialparametrar för brännbara material?
- Är flamspridningsberäkningar lämpliga att använda för att ta fram en dimensionerande brand vid en analytisk dimensionering av en byggnad?

## 1.5 Metod

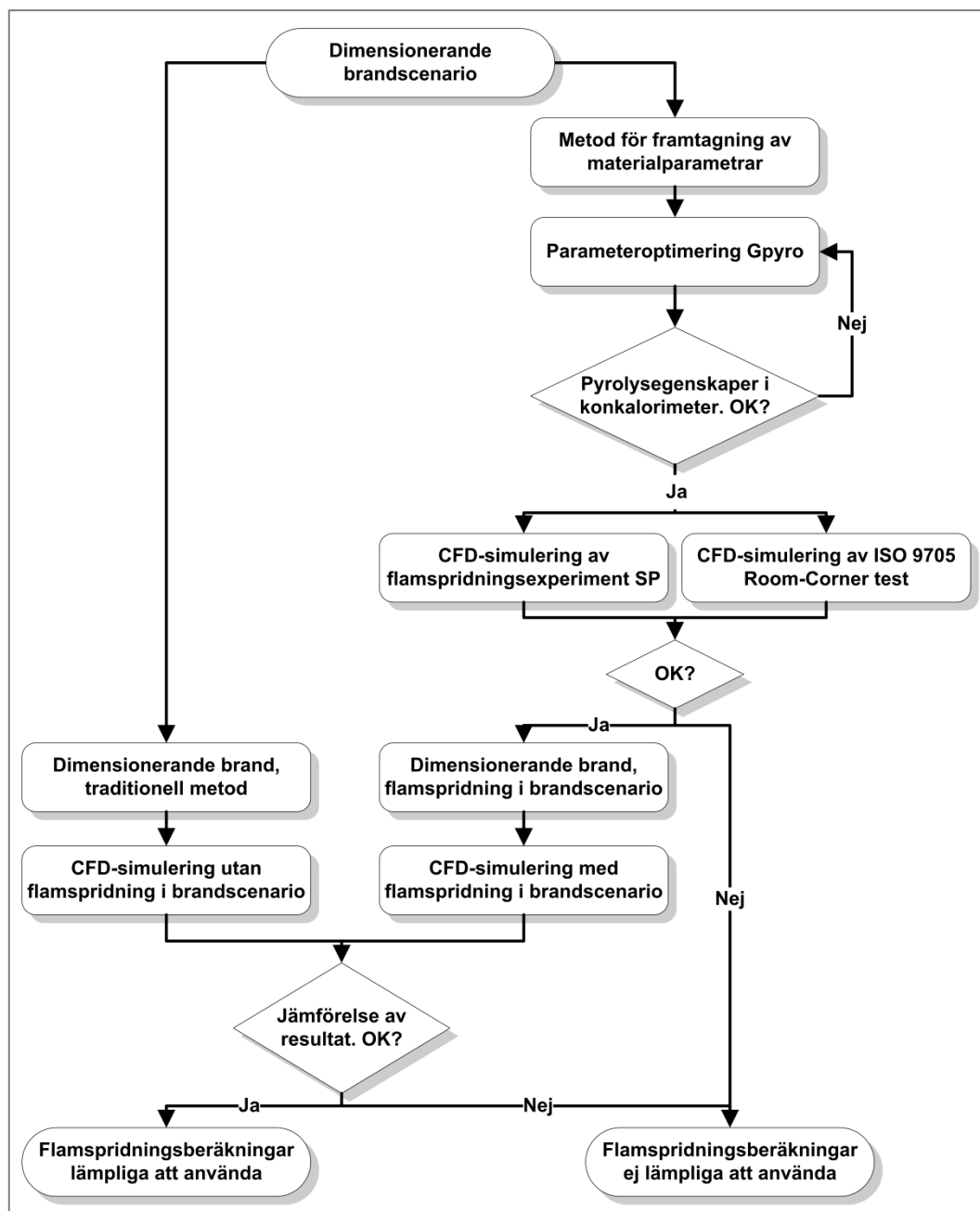
Arbetet delas in i följande steg:

Arbetet inleds med en litteraturstudie för genomgång av befintlig litteratur inom ämnet samt ett besök på det valda objektet. Därefter identifieras och bestäms en eller flera dimensionerande brandscenarier för objektet. Dimensionerande bränder tas fram för respektive scenario med en traditionell metod, utan flamspridningsberäkningar. Dessa simuleras med hjälp av FDS version 5.2, FDS5.

Efter detta undersöks möjligheterna till att använda flamspridningsberäkningar i FDS5 för att ta fram en dimensionerande brand. Först undersöks metoder för att ta fram materialparametrar utifrån experimentdata. Här ska bland annat datorprogrammet Gpyros förutsättningar för att ta fram materialparametrar utifrån experiment i konkalorimetern (ISO5660) [15] undersökas. Resultatet från Gpyro jämförs därefter med experimentdata. Pyrolysegenskaperna för de framtagna materialparametrarna kontrolleras sedan i FDS5 genom en enkel modell av konkalorimetern. När resultatet från pyrolysmodellen anses acceptabla, används de framtagna materialparametrarna i CFD-simuleringar av två olika flamspridningsexperiment. Det ena experimentet är genomfört av Blomqvist och van Hees vid SP [16], vilket är ett litet mindre flamspridningsscenario. Det andra experimentet är ISO 9705 Room-Corner test [17], vilket är ett för CFD-simuleringar komplext experiment i fullskala.

Om resultaten från flamspridningssimuleringarna anses acceptabla används de framtagna materialparametrarna för att simulera de dimensionerande brandscenarierna med flamspridningsberäkningar. Därefter kan resultatet jämföras med de dimensionerande bränderna som framtagits med en traditionell metod.

Genom denna metod kan lämpligheten att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand bedömas. En principiell skiss över metoden i rapporten redovisas i figur 1.1.



Figur 1.1. Principiell skiss över arbetsmetoden för rapporten.

## 1.6 Avgränsningar

Rapporten avgränsas till att endast undersöka användandet av flamspridningsmodeller vid det befintliga objektet Bökebergs Arena. Dessutom avgränsas rapporten till att undersöka flamspridningsberäkningar för FDS version 5.2, som var den senast tillgängliga versionen vid arbetets början.

## 2 Teori

---

Följande kapitel redovisar översiktligt teorin bakom modellering av brandförlopp, CFD-simuleringar, programmet Fire Dynamics Simulator samt flamspridning och flamspridningsberäkningar. Dessutom redovisas en beskrivning av programmet Gpyro och dess bakomliggande teori.

### 2.1 Modellering av brandförlopp

Genom att antalet komplexa byggnader som inte följer en traditionell utformning blivit allt vanligare, används analytisk dimensionering av det byggnadstekniska brandskyddet allt oftare. Detta har i sin tur ökat användningen av datorbaserade modeller för att beräkna brandgasspridning och värmetransport inom en byggnad. [1]

Framförallt två kategorier av datormodeller används idag för att beräkna brandförlopp i en byggnad: Tvåzonsmodeller och CFD-modeller [2]. Tvåzonsmodellen bygger på antagandet att det bildas ett övre, varmt brandgaslager och ett undre kallt lager utan brandgaser. Dessa två lager anses var homogena med en distinkt gräns mellan dem. Den termiska skiktningen mellan det övre och undre lagret är orsakad av stigkrafterna hos de varma brandgaserna. På grund av tvåzonsmodellens antaganden och förenklingar är den endast giltig för ett begränsat antal fall där brandens storlek måste vara lämplig i förhållande till rummets storlek och geometri [2]. För andra fall är det mer lämpligt att använda CFD-modeller.

#### 2.1.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics, CFD, syftar till datorbaserade numeriska metoder för att lösa tredimensionella, tidsberoende, icke-linjära och partiella differentialekvationer vilka beskriver flödet av en fluid. Dessa ekvationer, vanligen benämnd Navier-Stokes ekvationer, är härledda från grundläggande naturlagar innehållande kontinuitetsekvationerna för massa, energi och rörelsemängd. [18]

I en CFD-modell delas den aktuella geometrin in i ett stort antal mindre kontrollvolymmer för att lösa flödet av fluider inom geometrin. Dessa kontrollvolymmer, eller celler, utgör tillsammans ett rutnät som innefattar hela geometrin. För att helt kunna modellera ett brandförlopp behövs förutom de grundläggande Navier-Stokes ekvationerna ytterligare ekvationer för att beskriva de ingående fysikaliska egenskaperna av en brand såsom turbulens, förbränning, strålning, sotbildning, sottransport och pyrolys. Eftersom dessa fysiska fenomen är mer eller mindre komplexa, är det med dagens datorer inte möjligt att lösa samtliga ekvationer som exakt beskriver alla dessa fenomen. Därför måste en eller flera av dessa egenskaper beräknas genom att använda approximativa modeller som förhoppningsvis återger verkligheten på ett korrekt sätt. Det är här som CFD-lösningen frångår den exakta lösningen av Navier-Stokes ekvationer och istället ger en approximativ lösning, som det är upp till användaren att bedöma hur representativ den är för verkligheten. [18]

### 2.1.2 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Fire Dynamics Simulator, FDS, är ett CFD-program för att beräkna flöden av fluider i samband med en brand och är framtaget av National Institute of Standards and Technology, NIST [19]. Genom att programmet är relativt lättanvänt och dessutom är tillgängligt gratis på NISTs hemsida används programmet flitigt för att modellera brandförlopp. Den version av programmet som använts i denna rapport är version 5.2, i rapporten benämnd som FDS5.

FDS löser numeriskt en variant av Navier-Stokes ekvationer, anpassade för att beräkna termiskt drivet flöde med låg hastighet och med en extra tyngdpunkt på beräkning av brandgas- och värmetransport [19]. De partiella derivatorna för kontinuitetsekvationerna för massa, rörelsemängd och energi är approximerad med hjälp av en metod kallad "Finite Difference Method" [19]. Turbulensen modelleras generellt av Smagorinskys form av Large Eddy Simulation, LES, även om möjlighet till Direct Numerical Solution, DNS, finns inbyggt i programmet [19]. Strålningstransporten beräknas genom en metod kallad "Finite Volume Method" för en "grågas modell" [19]. Förbränningen modelleras generellt med en modell som kallas för "Mixture Fraction". De olika metoderna som programmet använder förklaras kortfattat i Bilaga A. För utförligare beskrivning av den bakomliggande teorin i FDS rekommenderas FDS (version 5) Technical Reference Guide [19].

#### Beräkningsdomän och cellstorlek

För att kunna genomföra beräkningar i FDS måste geometrin delas in i en eller flera rektangulära beräkningsdomäner, så kallade *meshes*. Varje beräkningsdomän består i sin tur av ett antal rektangulära celler. Vanligast är att dessa celler är kubiska, men det finns även möjlighet att använda celler där en eller två sidor på cellen inte är likformiga med de övriga sidorna. En beräkningsdomän med cellstorleken 10 cm anger att beräkningsdomänen består av celler där varje cell har sidorna 10 cm. [4]

Från FDS5 User's Guide [4] ges ett förslag på hur man kan få en uppfattning på hur väl cellerna i beräkningsdomänen återger flödet i brandplymen. Detta görs genom att beräkna ett dimensionslöst tal,  $D^*/\delta x$  där  $D^*$  är brandplymens karaktäristiska längd [4]:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2.1)$$

och  $\delta x$  är cellstorleken. I ekvation (2.1) är  $\dot{Q}$  brandens effektutveckling och  $\rho_\infty$ ,  $c_p$  samt  $T_\infty$  är luftens densitet, specifik värmekapacitet respektive temperatur.  $D^*/\delta x$  kan ses som antalet celler som behövs för att återge brandplymens karaktäristiska längd. Ett värde mellan 4-16 för  $D^*/\delta x$  anges som ett exempel där cellerna tillräckligt väl återger flödet i brandplymen [4]. I McGrattan, Baum och Rehm [20] ges ett förslag på en acceptabel cellstorlek då  $D^*/\delta x$  är cirka 10.

## 2.2 Flamspridning

För att kunna beräkna och modellera flamspridning är det viktigt att förstå hur flamspridning sker, vilka processer som är involverade, vilka faktorer som påverkar samt hur dessa påverkar hastigheten på flamspridningen. Detta avsnitt redovisar den grundläggande teorin för flamspridning.

Flamspridning definieras som den process som perimetern av en brand växer och blir större [21]. I denna rapport syftar flamspridning till flamspridningen *vid ytan* av ett bränsle i fast- eller vätskefas. Framförallt flamspridning hos fasta bränslen behandlas, men mycket av teorin gäller även för brännbara vätskor. Därmed syftar flamspridning i denna rapport inte till flamspridningen vid förblandade gasblandningar, där flamfronten sprider sig genom gasblandningen långt från ytan av bränslet som genererade de brännbara gaserna.

En brands tillväxt beror till stor del av den hastighet som flammorna sprider sig med och därmed ökar arean av involverat brännbart material i branden [22]. En ökning av brandens area har den största betydelsen för ökningen av brandens effektutveckling [23]. Eftersom brandens effektutveckling används för att bedöma temperaturer, sikt, toxicitet med mera vid en brand har hastigheten på flamspridningen stor betydelse för att bedöma hur farlig en brand potentiellt är [21].

### 2.2.1 Antändningsteori

Flamspridningen kan beskrivas som en serie av antändningar i närvaro av en pilotlåga. Därför ger grundläggande antändningsteori en grund för att förstå flamspridningsprocessen. Vid en antändning av ett fast material med hjälp av en pilotlåga sker flertalet fysiska och kemiska processer. Förenklat kan antändningen beskrivas av tre stadier: uppvärmning, termisk nedbrytning och omblandning i gasfas som påbörjar gasfas-reaktioner. I det första stadiet värms materialet från ursprungstemperaturen upp till den temperatur där materialet börjar brytas ned till andra molekyler. Faktorer som påverkar uppvärmningen är bland annat tillfört värme, värmeförluster till omgivningen samt termiska egenskaper hos materialet. Den termiska nedbrytningen i det andra stadiet kallas för pyrolys, vilken påverkas av den kinetiska och exoterma alternativt endoterma nedbrytningsreaktionen. Förångning av brännbara gaser är en del av pyrolysen, men pyrolysen kan även ge upphov till andra nedbrytningsprodukter i fast- och/eller vätskefas. I det tredje stadiet avges pyrolysgaserna och blandas till en bränsle-luftblandning. När bränsle-luftblandningen når den undre brännbarhetsgränsen kan en pilotlåga antända blandningen. En flamma bildas då vid ytan av materialet om pyrolyshastigheten är tillräcklig för att underhålla flammen. [24]

Då en flamma bildats vid ytan av materialet fungerar denna både som en värmekälla och som en pilotlåga. Flammen kan således värma upp det omgivande materialet till antändningstemperaturen och därefter antända de brännbara gaser som avges, vilket resulterar i att flammen sprider sig. [22]

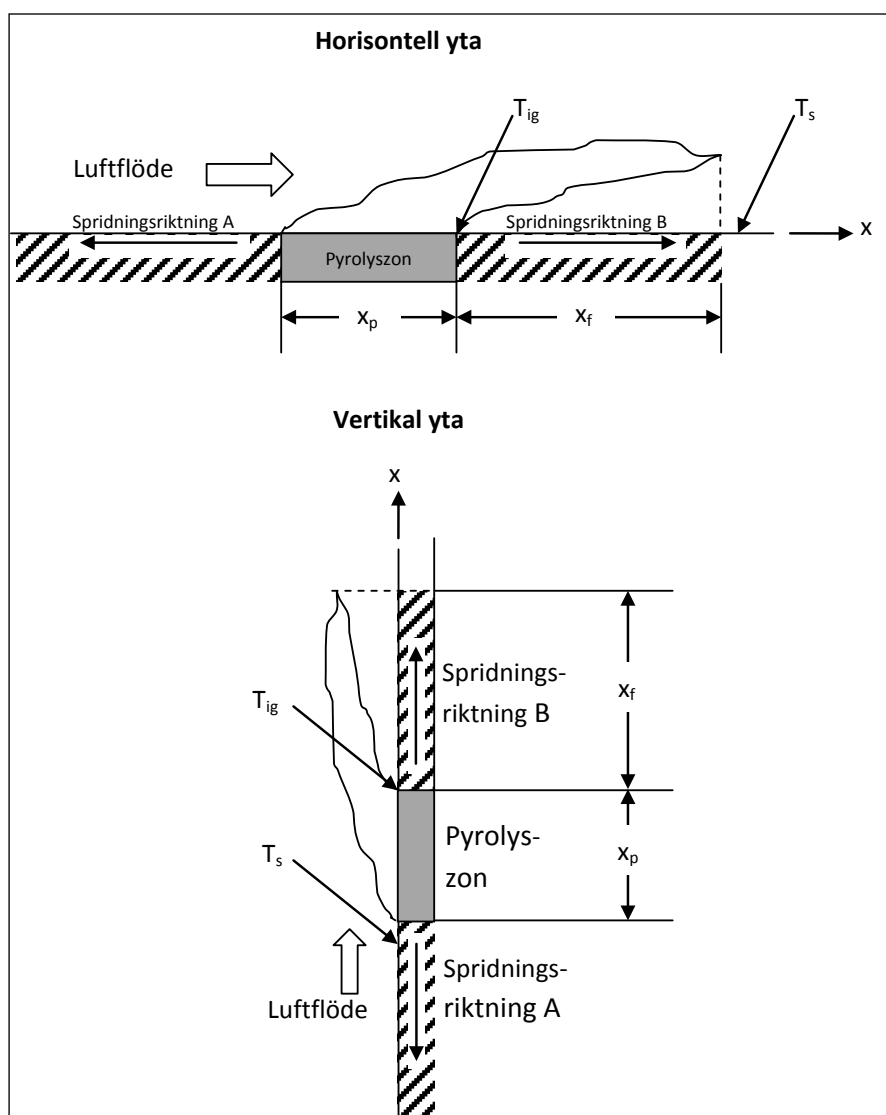
## 2.2.2 Faktorer som påverkar flamspridning

Det finns ett flertal faktorer som påverkar med vilken hastighet som flamspridning hos ett material sker. För att korrekt kunna beräkna flamspridning är det viktigt att veta vilka dessa faktorer är samt hur de påverkar flamspridningen. Nedan redovisas de viktigaste faktorerna som påverkar flamspridningen.

### Flamspridning med eller mot luftflödet

Med vilken hastighet flamspridningen sker beror till stor del på hur flamspridningen sker i förhållande till omgivande luftflöden. Luftflödet kan vara orsakat av vind, en mekanisk fläkt eller av branden själv där den stigande plymen orsakar ett luftflöde in vid botten av flamman. Därför kan man särskilja på två typer av flamspridning: *flamspridning med luftflödet* och *flamspridning mot luftflödet*.

Ett fast material, till skillnad från en brinnande vätskeyta, kan ha olika lutningar på bränsleytan vilket också påverkar hastigheten på flamspridningen. Två typer av flamspridning som normalt kan ingå i en rumsbrand redovisas i figur 2.1.



**Figur 2.1.** Flamspridning hos en horisontell respektive vertikal yta. Spridningsriktning A är *mot* luftflödet och spridningsriktning B är *med* luftflödet. Baserad på Janssens [23].



I figuren anges  $x_p$  som utbredningen av pyrolyszonen,  $T_{ig}$  som antändningstemperaturen och  $T_s$  som ursprungstemperaturen för ytan som inte utsatts för någon värmepåverkan av flammen. Den övre delen av figur 2.1 visar flamspridning vid en horisontell yta i samband med ett påtvingat luftflöde som får flammen att luta. Spridningsriktning A är *mot* luftflödet och spridningsriktning B är *med* luftflödet. För spridningsriktning A blir synfaktorn från flammen mot bränsleytan till vänster om pyrolyszonen låg och värmeledning i gasfas är den dominerande värmetransporten till bränsleytan [23]. Flammen värmer endast upp en liten zon, några enstaka millimeter, utanför pyrolyszonen i spridningsriktning A. Därför blir flamspridningshastigheten i den riktningen låg [23]. För spridningsriktning B blir däremot synfaktorn mot bränsleytan till höger om pyrolyszonen hög och värmetransport till bränsleytan sker främst genom strålning och konvektion [23]. Hastigheten för flamspridningen i denna riktning blir därför högre än flamspridningen mot luftströmmen.

Om det *inte* skulle vara ett påtvingat luftflöde skulle flammen inte luta utan den skulle brinna mer rakt uppåt. De termiska stigmakrafterna som bildas vid förbränningen i flammen skulle då orsaka ett luftflöde in i flammen från båda sidor i figuren och runt om hela flammen i det verkliga fallet. Detta skulle innebära att all flamspridning skulle ske enligt teorin för flamspridning mot luftströmmen. [23]

Den nedre delen av figur 2.1 visar flamspridning hos en vertikal yta. I detta fall behöver inte luftflödet vara mekaniskt pådrivet utan kan uppstå på grund av den naturliga, termiska stigmakraften som bildas vid förbränningen hos flammen. I övrigt gäller samma förutsättningar som hos den horisontella ytan, vilket innebär att hastigheten på flamspridningen i spridningsriktning B sker väsentligt mycket snabbare än i spridningsriktning A. [23]

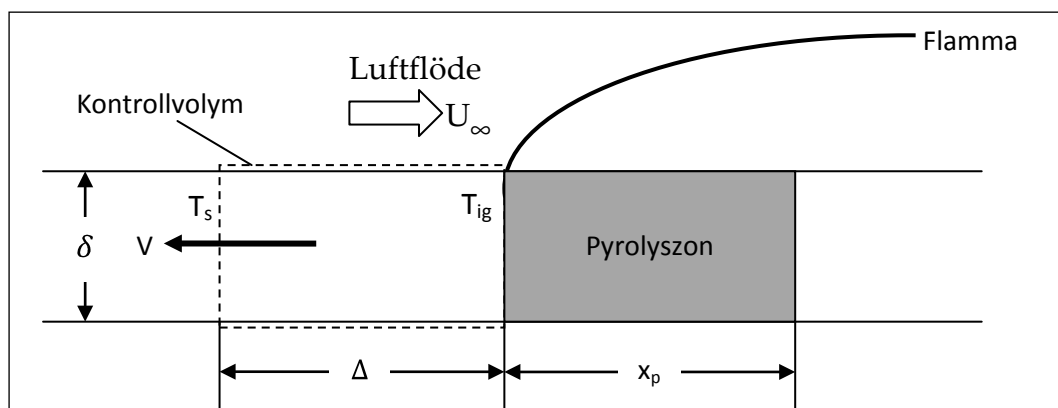
Ett påtvingat luftflöde eller det naturliga inflödet av luft i flammen kan påverka flamspridningen på andra sätt än att bara påverka synfaktorn från flammen mot bränsleytan. Om kemiska effekter, det vill säga omblandningen av bränsle-luft, är av betydelse för flamspridningen kan luftflödet bidra till en snabbare omblandning. Kemiska effekter är av betydelse om den kemiska förbränningsreaktionen i flammen tar längre tid än det tar för bränslepartiklarna att passera genom flammen, vilket medför att en del bränslepartiklar passerar flammen utan att förbrännas. [25]

### **Tjocklek på materialet**

Eftersom flamspridning sker genom att det brännbara materialet värms upp till dess att det börjar avge tillräckligt med pyrolysgaser för att antändas, kan tjockleken på materialet spela en stor roll för flamspridningen. För tunna material där ingen eller väldigt liten temperaturgradient mellan materialets ytor uppstår vid uppvärmning, sker uppvärmningen och därmed flamspridningen väldigt snabbt [22]. Om tjockleken på materialet ökar minskar hastigheten på flamspridningen tills dess att hastigheten blir oberoende av tjockleken, om övriga materialegenskaper är desamma [22]. Därför görs det ofta en uppdelning mellan termiskt tunna material och termiskt tjocka material när det gäller flamspridning [22].

**Materialegenskaper**

I figur 2.2 visas en principiell skiss över flamspridningen hos ett termiskt tunt material med tjockleken  $\delta$  och flamspridningshastigheten  $V$  i riktning mot luftflödet  $U_\infty$ .



**Figur 2.2.** Principiell skiss för flamspridning hos ett material med tjockleken  $\delta$  och flamspridningshastigheten  $V$  mot luftflödet  $U_\infty$ . Baserad på Janssens [23].

Vid pyrolyszonen är temperaturen lika med antändningstemperaturen  $T_{ig}$  och en liten sträcka  $\Delta$  från pyrolyszonen har materialet ursprungstemperaturen  $T_s$ . Antaget att inget värme leds ut från botten av materialet och att värmestrålningen från flaman,  $\dot{q}''$ , är konstant över sträckan  $\Delta$ , blir värmebalansen i kontrollvolymen [23]:

$$\rho c \delta (T_{ig} - T_s) V = \dot{q}'' \Delta \quad (2.2)$$

där  $\rho$  är materialets densitet och  $c$  är materialets värmekapacitet.

Om  $\tau$  är det termiska nedträngningsdjupet i materialet, alltså hur djupt som materialet har värmts upp från ursprungstemperaturen, kan denna beräknas med hjälp av värmeledningsteori enligt:

$$\tau \approx \sqrt{\frac{k}{\rho c} t} \quad (2.3)$$

där  $k$  är materialets konduktivitet och  $t$  är tiden som materialet värms upp [25]. Om  $\delta < \tau$  kan materialet anses vara termiskt tunt och om  $\delta > \tau$  kan materialet istället anses vara termiskt tjockt under den tid som materialet värms upp. För termiskt tjocka material kan  $\delta$  i figur 2.2 istället få stå för det termiska nedträngningsdjupet. Ekvation (2.2) är då fortfarande giltig och tiden som kontrollvolymen värms upp är lika med tiden det tar för pyrolyszonen att färdas sträckan  $\Delta$ :

$$t = \frac{\Delta}{V} \quad (2.4)$$

Här kan ekvation (2.3) och (2.4) kombineras med ekvation (2.2) till:

$$V = \frac{(\dot{q}'')^2 \Delta}{k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (2.5)$$

vilken alltså gäller för termiskt tjocka material [25].

Skillnaden mellan termiskt tunna och termiskt tjocka material kan alltså bedömas med hjälp materialets densitet, värmekapacitet, termisk konduktivitet samt materialets tjocklek. Förutom dessa egenskaper påverkar även materialets fukthalt vilka flamspridnings-egenskaper materialet har [26].

### Materialgeometri

För nedåtriktad flamspridning på en vertikal yta har *bredden* på materialets yta liten eller ingen betydelse. För uppåtriktad flamspridning har däremot bredden på materialet visat sig påverka hastigheten på flamspridningen. Detta beror mestadels på att den ökade bredden på materialet ökar den brinnande arean, vilket resulterar i en högre flamhöjd och värme-strålningen mot materialet blir därmed större. För horisontell flamspridning ger en ökad bredd på materialet en ökad area för pyrolyszonen, vilket borde resultera i högre flamhöjder och högre strålning mot materialets ytor. Även här påverkar alltså bredden på materialet flamspridningshastigheten. [22]

Drysdale [22] påvisar också effekten av hörn och kanter på materialet som brinner. Om flamspridning sker antingen i ett hörn eller vid en kant så kommer flamspridningshastigheten att öka. För flamspridning vid ett hörn beror detta på att flammorna kommer att stråla mot den motsatta väggen och därmed öka den infallande strålningen mot materialet. För flamspridning över en kant beror detta på att kanten på materialet kommer att få egenskaper som ett termiskt tunt material, med värmepåverkan på flera sidor av materialet. [22]

Ur ovanstående beskrivning inses att materialets storlek, tjocklek och geometri har betydelse för med vilken hastighet som flamspridningen sker. Detta medför att det kan vara olämpligt att använda småskaleförsök för att bedöma flamspridning och brandegenskaper hos material i stor skala [22].

### Omgivningsförhållanden

Det finns vissa omgivningsförhållanden som särskilt påverkar flamspridningen och med vilken hastighet den sker. Förhållandet i den omgivande luften är en av dessa faktorer. En ökning av syrekonzentrationen i den omgivande luften medför en ökning av flamspridningshastigheten, genom att bränslet både antänds lättare och brinner med en högre effekt. Ett ökat atmosfärstryck ger snabbare flamspridning genom att det medför en ökning av den effektiva syrekonzentrationen. Som påpekats tidigare har omgivande luftflöden betydelse för hastigheten på flamspridningen. Förutom att det påverkar flammans lutning samt återstrålning mot bränsleytan kan luftflödet öka omblandningen och förbränningen i flamfronten. Generellt gäller att flamspridningen kommer att öka om det finns en stadig vind eller luftflöde i anslutning till branden. Om vinden eller luftflödet blir för kraftig kommer dock branden att slockna, genom så kallad "*blow-off*". [22]

En förhöjd rumstemperatur ökar flamspridningshastigheten genom att mindre värme går åt för att värma upp bränslet från ursprungstemperaturen till antändningstemperaturen. En extern strålningskälla, till exempel ett varmt brandgaslager, som ökar den infallande strålningen mot bränsleytan kommer också att öka flamspridningshastigheten. Detta beror främst på att den externa strålningen förvärmer de bränsleytor som ännu inte påverkats av flammorna. Men den externa strålningen kommer även att bidra till en ökad pyrolyshastighet, vilket ger en kraftigare flamma med högre återstrålning mot de angränsande bränsleytorna. [22]

### 2.2.3 Modellering av flamspridning

Av avsnitt 2.2.1 och 2.1.2 framgår att flamspridning är ett väldigt komplext problem som kräver information om bränsle och omgivningsförhållanden samt beräkning av förbränning och värmetransport genom ledning, strålning och konvektion. För att bedöma flamspridningen i en byggnad måste kemiska processer, förbränning, transport av brandgaser, värmetransporter genom strålning, ledning och konvektion i fast-, gas- och vätskefas beräknas på ett så korrekt sätt som möjligt. Till detta måste man känna till och kunna ange materialsammansättning och materialparametrar för komplexa material. Alla dessa delprocesser bidrar till en osäkerhet när det gäller beräkning av flamspridning och detta förklarar varför flamspridning är en av de mer komplicerade processer att beräkna när det gäller bränder.

Ett vanligt antagande när det gäller beräkning och modellering av flamspridning är att flamspridningen vid ytan av ett bränsle bestäms av värmetransporten till bränslet. Detta innebär att man antar att den kemiska omblandningen och antändningen sker så snabbt att det inte har betydelse för flamspridningen [25]. Den kemiska kinetiken har betydelse för flamspridningen då tiden för den kemiska reaktionen,  $t_{chem}$ , är lång i förhållande till tiden det tar för fluidflödet att passera genom flaman,  $t_{flow}$  [25]. Betydelsen av de kemiska effekterna kan bedömas med hjälp av Damköhlers tal,  $D$ , som kan uttryckas enligt [25]:

$$D \sim \frac{t_{flow}}{t_{chem}} \quad (2.6)$$

Detta medför att den kemiska kinetiken har betydelse för flamspridningen vid låga Damköhlers tal.

## 2.3 Gpyro

*Gpyro* är en gratis programvara som kan hämtas från <http://code.google.com/p/gpyro>. *Gpyro* innehåller pyrolysmodeller för att simulera termisk-kemiska processer på grund av uppvärmning av fasta material. *Gpyro* kan användas för simulering av termiska gradienter inom materialet i 0D (samma gradient genom hela materialet), 1D eller 2D. Användaren kan själv bestämma hur avancerad pyrolysmodell som ska användas, alltifrån en enkel en-dimensionell transient värmeledningsmodell för ett homogent material med konstanta materialegenskaper till mera avancerade tvådimensionella pyrolysmodeller. Mera avancerade pyrolysmodeller kan fås genom att ta hänsyn till bland annat diffusion/konvektion hos gasformiga ämnen inom porösa kompositmaterial med temperaturberoende termofysikaliska egenskaper, strålningsabsorption på djupet av materialet, värmestrålning inom porerna samt reaktioner och nedbrytning i flera steg av fasta och gasformiga ämnen. I *Gpyro* kan man även välja samma pyrolysmodell som används i FDS5 och programmet skapar automatiskt indatafiler som kan användas i FDS5 för att specificera sitt material. [27]

Programpaketet innehåller dessutom en programvara, *Gpyro Property Estimation Program*, som genom en genetisk algoritm, GA, försöker optimera materialparametrar så att resultaten från pyrolysmodellen överensstämmer med resultat från småskaleförsök [27]. Detta innebär att utifrån experimentdata för ett material, från till exempel konkalorimetern, söker programmet en uppsättning materialparametrar som ger ett resultat från den använda pyrolysmodellen som är så likt experimentets testdata som möjligt. Materialparametrarna är inte garanterade att vara de mest optimala eller motsvara materialets "verkliga" parametrar [9]. Därför är det inte säkert att dessa materialparametrar ger bäst resultat om de används för en annan pyrolysmodell med andra förenklingar och antaganden [9]. Det är heller inte säkert att dessa materialparametrar kan användas för att beskriva materialegenskaperna vid flamspridning i fullskala [9].

De materialparametrar som fås ur programmet kommer att närma sig den optimala, verkliga lösningen om:

- experimentdata är tillräckligt bra uppmätt och innehåller tillräckligt med information för att härleda en uppsättning unika materialparametrar
- pyrolysmodellens antaganden och förenklingar återger de fysikaliska och kemiska processer som styr pyrolys och flamspridning
- de angivna gränsskikts- och omgivningsförhållanden stämmer med den verkliga experimentuppsättningen. [28]

Detta skulle medföra att de materialparametrar som fås ur programmet skulle kunna användas för att beräkna flamspridning i fullskala [28]. Vilka materialparametrar som programmet kan justera för att optimera pyrolysmodellens resultat väljer användaren. För indata till programmet måste en eller flera av följande egenskaper ha mätts kontinuerligt vid försöket: temperatur, massavbrinring eller tjocklek på materialet.

### 2.3.1 Genetisk algoritm

En genetisk algoritm, GA, är en optimeringsalgoritm som använder principerna från Darwins evolutionsteori för att hitta en optimal lösning på ett problem [28]. Tanken är att dåliga lösningar så småningom ska dö ut och bra, optimala lösningar ska leva vidare. GA har fördelen att den kan hantera olinjära problem med ett stort antal justerbara parametrar [28].

I GA motsvarar varje lösning en *individ* och varje individ består av ett antal modellparametrar, där modellparametrarna kallas för *gener*. En gen kan till exempel vara konduktiviteten hos ett material eller aktiveringsenergin för en reaktion. Först så skapas en inledande *population* med ett antal individer, i storleksordningen 100-1000 individer. Den inledande populationen kallas för generation ett. Varje individs lösning beräknas och jämförs med hur väl lösningen passar angiven experimentdata. På så sätt får varje individ ett värde på hur bra lösningen överensstämmer med experimentet, vilket används för att rangordna individerna i populationen. Nästa steg är att skapa nästa generations population. Detta görs genom att två individer i en generation blir *föräldrar* till nästa generations *avkomma* och där föräldrarnas gener paras ihop för att skapa en avkomma. Ju bättre lösning en individ har, desto högre är chansen att individen väljs ut för reproduktion. [28]

För att bevara variabiliteten i populationen och säkerställa att så stor del av alla möjliga lösningar testas kan vissa individers gener väljas ut för mutation. Sannolikheten för att en gen ska muteras väljs av programmets användare. Mutationen sker genom att genen som valts ut byts ut mot ett slumpmässigt tal som befinner sig inom den övre och undre gräns som användaren har specificerat för varje gen. På så sätt riskerar inte programmet att hitta orimliga lösningar med till exempel negativa värden på fysikaliska egenskaper. Därefter byts individerna i den gamla populationen ut mot avkommorna för att skapa nästa generations population. Proceduren med beräkning av lösning, urval för reproduktion, mutation och ersättning av individer upprepas tills antingen ett antal generationer har gjorts eller att den mest optimala lösningen inte förbättras i de efterkommande generationerna. [28]

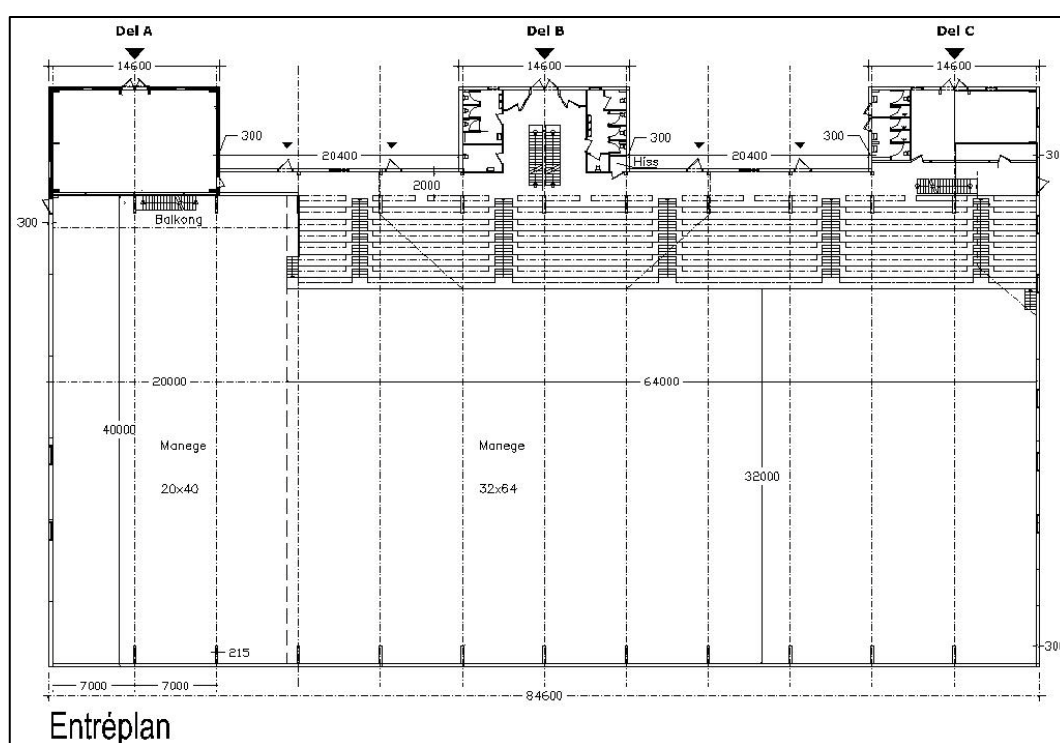
Strukturen för en genetisk algoritm gör att ett GA-program enkelt kan programmeras för att köras parallellt på flera processorer eller ett datorkluster, vilket minskar beräkningstiden avsevärt [28]. Eftersom huvuddelen av beräkningstiden är att beräkna och testa olika individers lösningar, kan detta enkelt delas upp på flera datorer/processorer. Till skillnad från CFD-beräkningar kan en sådan uppdelning göras utan att man riskerar att introducera ytterligare felkällor i lösningen. Gpyro Property Estimation Program har av utvecklarna framgångsfullt körts parallellt på kluster med över 100 processorer [27].

## 3 Objektsbeskrivning

För att antalet möjliga scenarier och variabler som måste undersökas i rapporten inte ska bli alltför många avgränsas arbetet till att endast undersöka användandet av flamspridningsberäkningar hos ett befintligt objekt. Följande kapitel redovisar en beskrivning av objektet. Objektet består av kv. Yddinge 3:1, Svedala, även benämnt Bökebergs Arena. Arenan är främst designad för att klara stora hästsportevenemang, men även för en möjlighet till att anordna andra evenemang såsom konserter, mässor, konferenser och utställningar. [29]

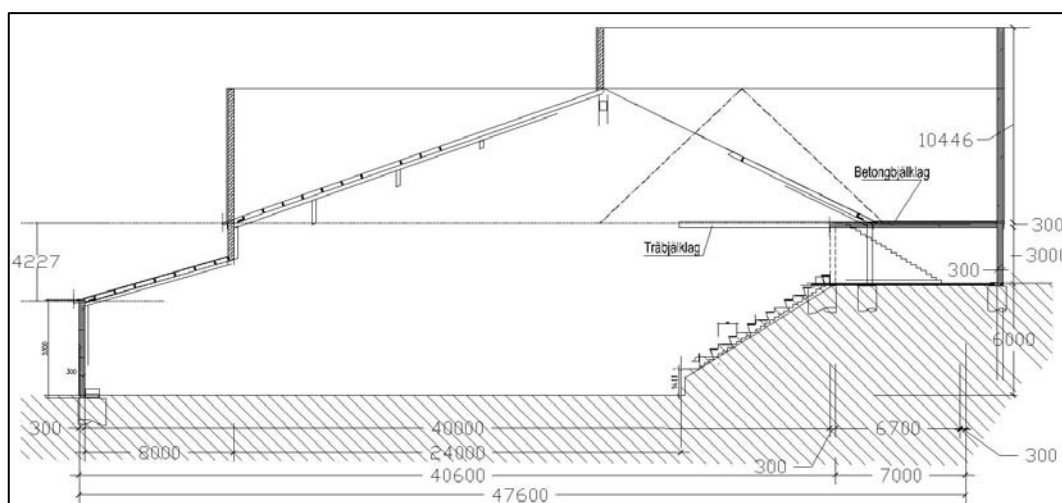
### 3.1 Byggnadsbeskrivning

Byggnaden är av typen suterrängbyggnad och består av en manege med läktare och tre stycken huskroppar, se figur 3.1. [30]



**Figur 3.1.** Principskiss över Bökebergs Arena, entréplan. Manegen, läktaren och huskroppar del A, B och C visas i figuren.

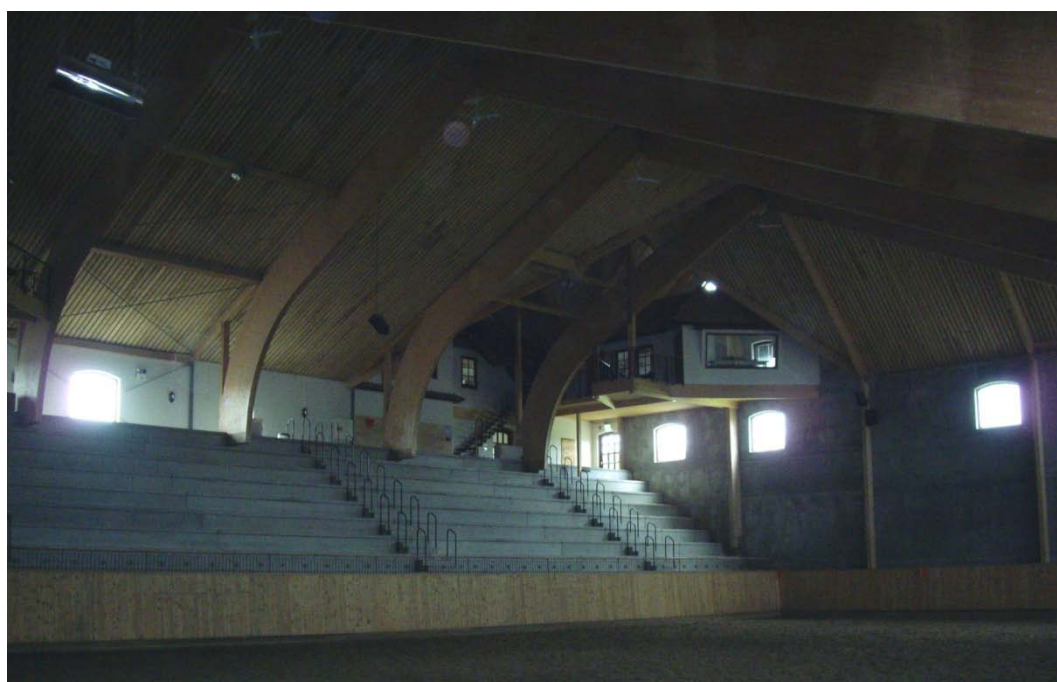
Huskropparna är benämnd del A, B respektive C i figuren. Huvudentrén till arenan är belägen i del B och befinner sig i markplan. Då byggnaden är byggd i suterräng ligger även manegen och läktaren i markplan. Byggnadens suterrängkonstruktion visas i figur 3.2. Del A och C består av tre våningsplan, där det översta är ett entresolplan. Del B består av tre våningsplan.



**Figur 3.2.** Principskiss över Bökebergs Arena. Figuren visar ett tvärsnitt genom del B vilken innehåller restaurangen med tillhörande balkong på andra våningen.

Byggnaden är fristående med en byggnadsarea på cirka 3500 m<sup>2</sup>. Väggarna består av sten och gips. Stommen består av träreglar och limträbalkar. Taket är uppbyggt av fiberbetong, isolering, brandklassad fiberduk samt brandskyddsmålat trä. Bild över tak- och väggkonstruktionen visas i figur 3.3. [30]

Byggnaden klassas som en brandteknisk byggnadsklass Br1 och hela byggnaden utgör en brandcell. [30]

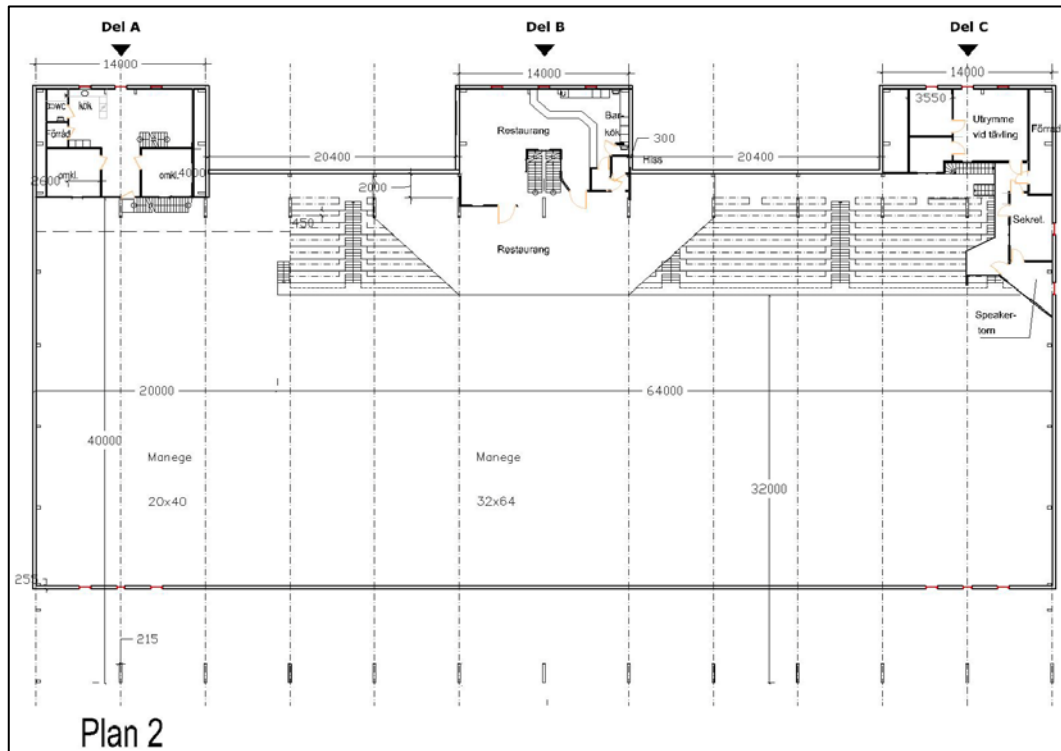


**Figur 3.3.** Bild över läktaren samt tak- och väggkonstruktion.



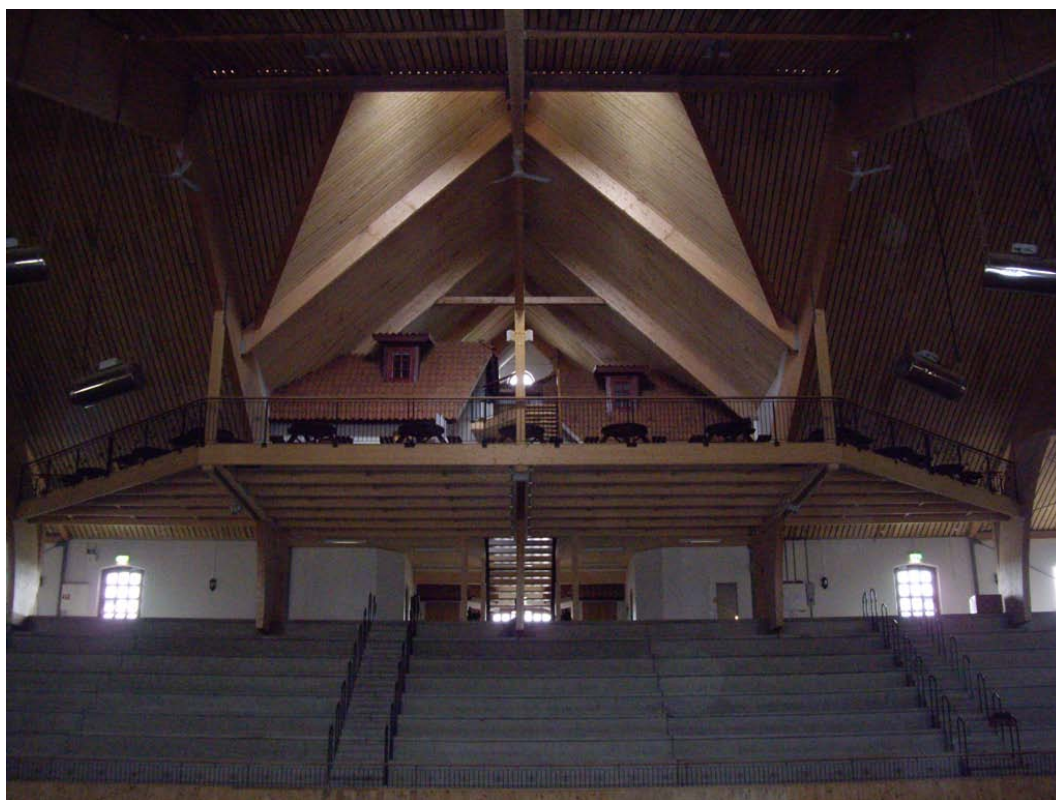
### 3.2 Verksamhetsbeskrivning

Byggnadens huvudsakliga verksamhet är hästsport samt större evenemang och uthyrningar. Byggnaden har även en restaurang med en tillhörande balkong på andra våningen i del B. I entréplan finns även kontor, pentry och i del A ett klassrum för undervisning av ridgymnasium. Omklädningsrum, loger och uppehållsrum för funktionärer, tävlande och artister finns i del A, B samt C. I del C finns även ett speakertorn och sekretariat i plan två. En principskiss över plan två visas i figur 3.4. [30]



**Figur 3.4.** Principskiss över Bökebergs Arena, plan två. I figuren syns restaurangen med tillhörande balkong i del B, speakertornet och sekretariatet med tillhörande utrymmen i del C samt manegen och läktaren.

En bild över restaurangen med tillhörande balkong visas i figur 3.5.



**Figur 3.5** Bild över restaurangdelen med tillhörande balkong samt läktare. Byggnadens huvudsakliga entré skymtar bakom trappan som går upp till restaurangen. Två stycken fönster till uppehållsrum för tävlande på plan tre syns på restaurangens takutbyggnad. Även byggnadens speciella takkonstruktion syns i figuren.

Gångavstånd till utrymningsväg i manegen samt på läktaren överstiger schablonvärdet för en förenklad dimensionering och har därmed dimensionerats analytiskt. Gångavstånd till utrymningsväg har i övriga lokaler dimensionerats enligt en förenklad metod. Maximalt antal som tillåts befinna sig på restaurangen och balkongen tillsammans är 150 personer. Maximalt antal på läktaren vid hästsportevenemang är 1000 personer. Vid andra evenemang då besökande befinner sig både på läktaren och på manegen får upp till 3200 personer befinna sig på läktare och manege, förutom de 150 personer som tillåts befinna sig på restaurang samt balkong. Maximalt antal personer i klassrummet och kontoret i del A är 50 personer. [30]

## 4 Dimensionerande brand

---

Följande kapitel förklarar skillnaderna mellan ett dimensionerande brandscenario och en dimensionerande brand samt redovisar framtagandet av dimensionerande brand för Bökebergs Arena.

### 4.1 Nomenklatur

Benämningen "dimensionerande brand" motsvarar engelskans "Design fire" och syftar till att ge en kvantitativ beskrivning av den *förväntade* branden i ett dimensionerande brandscenariot. Den kvantitativa beskrivningen kan innehålla variabler såsom brandens effektutveckling, produktion av brandgaser, temperatur i brandgaserna och strålning från branden etcetera. Till skillnad från den *dimensionerande branden* innefattar det *dimensionerande brandscenariot* även en analys av brandens påverkan på byggnaden och människor som befinner sig i byggnaden samt byggnadens, människors och släcksystemens påverkan på branden. [31]

### 4.2 Bökebergs Arena

Eftersom gångavstånd till utrymningsväg dimensionerats analytiskt för manegen och läktare samt genom en förenklad metod i övriga lokaler, undersöks i denna rapport dimensionerande bränder endast för manegen samt läktare.

Då verksamheten vid Bökebergs Arena är väldigt varierande, är det svårt att definiera brandscenarier som är representativa för alla möjliga scenarier i manegen samt läktaren. Det är dock troligt att en brand under en mäsas eller ett evenemang, där en scen byggts upp för ett framträdande, ger sämre förutsättningar för utrymning än vid ett hästsportevenemang. Detta på grund av att mängden brännbart material ökar vid sådana tillställningar samt att antalet personer som får vistas i byggnaden ökar när även manegen används till besökare.

Vid mässor eller utställningar finns det ofta uppställda montrar, som skärmas av med provisoriska väggar. Dessutom kan det finnas mer eller mindre brännbart material i montrarna, såsom stolar, bord och liknande. Troliga tändkällor kan vara en anlagd brand, kortslutning av elinstallationer, då dessa ofta är provisoriskt monterade, eller att en papperskorg antänds av misstag med en cigarett eller liknande. På grund av mängden brännbart material som kan tänkas finnas i en sådan monter utgör detta ett brandscenario som skulle kunna ge en hög brandbelastning. Vid större fester eller andra evenemang finns möjlighet till att bygga upp en scen i manegen för artistframträdande. Sådana tillställningar utgör en särskild riskkälla, speciellt om matservice sker i manegen då brand förutom på scenen även skulle kunna uppstå i borden eller stolarna. Troliga tändkällor på scenen kan vara kortslutning av högtalare eller annan elektronikutrustning alternativt överhettade lampor och pyroteknik. Troliga tändkällor i serveringen kan vara levande ljus. Det är dock rimligt att anta att en brand på scenen skulle orsaka en högre brandbelastning än vid brand i serveringsborden. Eftersom förutsättningarna är lika i övrigt, anses att brandscenariot på scenen även är representativt för brand i serveringsborden.

Då rapportens huvudsakliga syfte är att undersöka möjligheten till att använda flamspridningsberäkningar i FDS5 och jämföra detta mot en enklare metod för val av dimensionerande brand, utgår denna rapport från de två troliga brandscenerierna som diskuterats ovan för att försöka få fram dimensionerande bränder. Framtagandet av dimensionerande bränder utan flamspridningsmodell, för de två brandscenerierna brand i monter och brand på scen, redovisas i avsnitt 4.2.1 respektive 4.2.2.

#### 4.2.1 Brand i monter

En normalstor monter bedöms ha måtten  $4 \times 5 \text{ m}^2$  (Bredd  $\times$  Längd) med en vägghöjd på 2,5 m utifrån tekniska bestämmelser vid Stockholmsmässan [32]. Två eller tre av monterns sidor kan antas bestå av en vägg. Enligt Stockholmsmässan [32], Elmia-mässan [33] och Svenska mässan [34] skall väggarna vara av antingen svårantändligt material i klass B-s1,d0 eller träfiberskivor, spånskivor, plywood och andra trämaterial. Detta är ett motsatsförhållande som är särskilt intressant eftersom de trämaterial som tas upp oftast klassas som D-s2,d0 [35]. Dessa trämaterial skulle därför ge väsentligt högre brandbelastning än ett material i klass B-s1,d0.

Ur ovanstående är det därför rimligt att anta att en monter vid en mäsas i Bökebergs Arena kan ha ovan nämnda mått och där väggarna, tre till antalet, består av någon form av trämaterial. Trämaterial antas istället för material i klass B-s1,d0 då det dels är troligt att trämaterial används, dels att de ger en högre brandbelastning. Antändningskälla kan vara kortslutning av provisoriskt upphängda elinstallationer eller en papperskorg som antänds av en cigarett eller liknande.

I *Abrahamsson* [36] bedöms en träpanel av plywood följa en  $at^2$ -kurva med en tillväxthastighet *fast* och ge en maximal effektutveckling på  $600 \text{ kW/m}$  bredd för en 2,4 m hög vägg. Detta skulle ge för en monter med två fyrametersväggar och en femmetersvägg en maximal effektutveckling på cirka 7,8 MW. Med en tillväxthastighet *fast*,  $0,047 \text{ kW/s}^2$ , uppnås denna effekt efter  $t = \sqrt{\frac{7800 \text{ kW}}{0,047 \text{ kW/s}^2}} \approx 400$  sekunder. Den maximala effektutvecklingen antas sedan konstant under en så pass lång tid att utrymning antas vara avklarad alternativt räddningstjänsten är på plats och kan göra en insats. Detta antas till cirka 15 minuter. Genom att väggarna bildar två stycken hörn är det dock troligt att detta minskar effektutvecklingen något, på grund av minskad inblandning av syre i respektive hörn. Byggnadens höga tak borde även bidra till en minskad återstrålning från brandgaserna, vilket också skulle innebära att effektutvecklingen skulle bli mindre. Men eftersom det förmodligen kan finnas annat brännbart material i en monter är det mer lämpligt att inte minska effektutvecklingen.

#### 4.2.2 Brand på scen

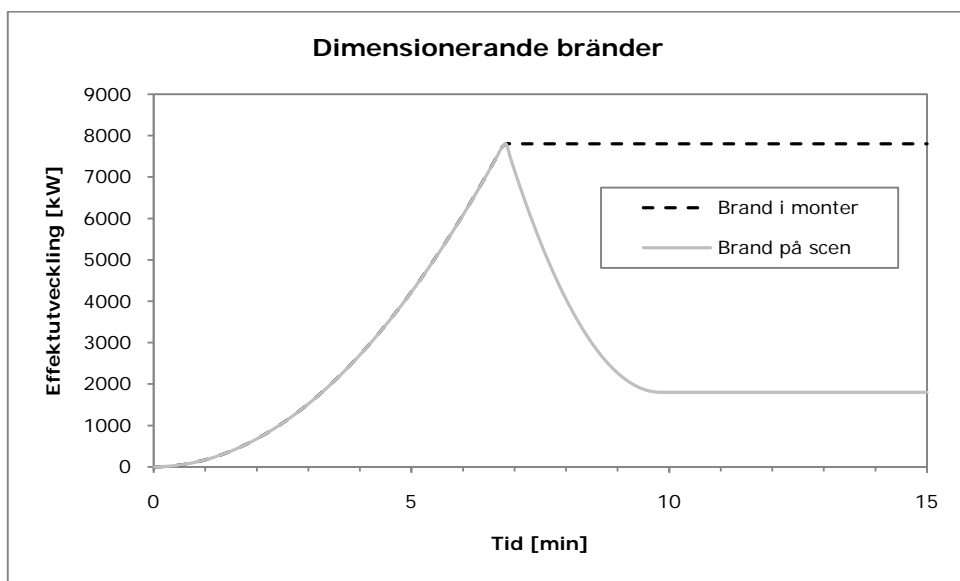
På en scen vid ett evenemang kan det tänkas finnas bland annat högtalare, hängande dekor, scengolv av trä och elektronisk utrustning. Högtalare består till stor del av trä och flera högtalare står ofta tillsammans eller staplade på varandra. En kortslutning i en högtalare eller någon annan tändkälla skulle innebära att en uppsättning högtalare börjar brinna och leda till brandspridning till exempelvis tygridån. Tygridåer som används vid sådana evenemang kan tänkas vara tändskyddsbehandlade men en initialbrand hos en högtalare skulle ge tillräckligt hög effektutveckling för att kunna antända en tändskyddsbehandlad tygridå.

I Borgström et. al [37] uppskattas en rimlig storlek på en högtalare till  $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ m}^3$  (Bredd  $\times$  Längd  $\times$  Höjd). Dessutom antas att två högtalare står staplad på varandra och ytterligare en sådan högtalarstapel står precis invid den första. Antaget att högtalare kan likställas med träpaneler av plywood ur Abrahamsson [36] fås en maximal effektutveckling på  $600 \text{ kW}$ /per meter bredd för en höjd på  $2,4 \text{ m}$ . Om skillnaden i höjd försummas ger det en maximal effektutveckling för två högtalarstaplar placerad bredvid varandra på  $600 \cdot (2 \cdot 1) + 600 \cdot (2 \cdot 0,5) = 1800 \text{ kW}$ . Enligt Abrahamsson [36] kan tillväxthastigheten för högtalarstapeln uppskattas att motsvara *fast*,  $0,047 \text{ kW/s}^2$ .

Tygridån antas motsvara försök Y7/11 i *Särdqvist* [38], vilket är utfört på en  $3 \times 3 \text{ m}^2$  stor gardin av flamskyddsbehandlad bomull. I försöket var gardinerna hopvikta till en bredd på en meter och maximal effektutveckling på  $1,5 \text{ MW}$  uppnås efter cirka en halv minut. Den maximala effektutvecklingen varar dock endast under mycket kort tid. En tygridå som används vid en normalstor scen har uppskattats till storleken  $10 \times 5 \text{ m}^2$  (Bredd  $\times$  Höjd). Då en sådan tygridå, hopvikt till cirka två meters bredd, blir nästan dubbelt så hög och dubbelt så bred som i försöket uppskattas en maximal effektutveckling på en sådan tygridå till cirka  $4 \cdot 1,5 \text{ MW} = 6 \text{ MW}$ . En maximal effektutveckling för både högtalarna och tygridån blir då cirka  $7,8 \text{ MW}$ . Här antas att högtalarna brinner med en maximal effektutveckling under så lång tid att den maximala effektutvecklingen hos tygridån hinner uppnås, antaget att den totala effektutvecklingen hela tiden följer en tillväxthastighet *fast* =  $0,047 \text{ kW/s}^2$ . Maximal effektutveckling inträffar därmed efter  $t = \sqrt{\frac{7800 \text{ kW}}{0,047 \text{ kW/s}^2}} \approx 400$  sekunder. Därefter antas tygridåns effektutveckling avta relativt snabbt, i storleksordningen två-tre minuter baserat på försöket i *Särdqvist* [38]. Effektutvecklingen antas avta till  $1,8 \text{ MW}$  under tre minuter efter maximal effekt uppnåtts. Därefter antas denna effekt vara konstant fram tills 15 minuter, då utrymning antas vara avklarad alternativt räddningstjänsten är på plats och kan göra en insats.

### 4.2.3 Effektutvecklingskurvor

De beräknade effektutvecklingskurvorna i förhållande till tiden för de två dimensionerande bränderna brand i monter och brand på scen redovisas i figur 4.1.



**Figur 4.1.** Effektutveckling i förhållande till tiden för brand i monter respektive brand på scen. Fram till cirka sju minuter är effektutvecklingen för de olika dimensionerande bränderna densamma.

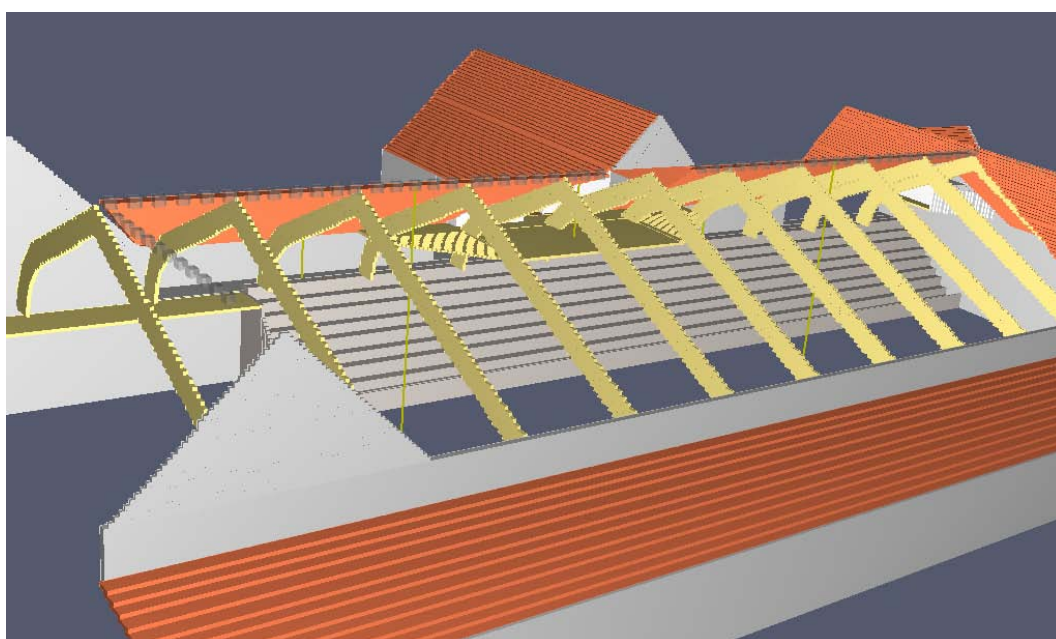
## 5 Simuleringar utan flamspridningsberäkningar

Följande kapitel redovisar simuleringsuppställning för Bökebergs Arena där den dimensionerande branden definierats enligt en traditionell metod utan flamspridningsberäkningar. För framtagandet av dimensionerande brand, se kapitel 4.

### 5.1 Simuleringsuppställning

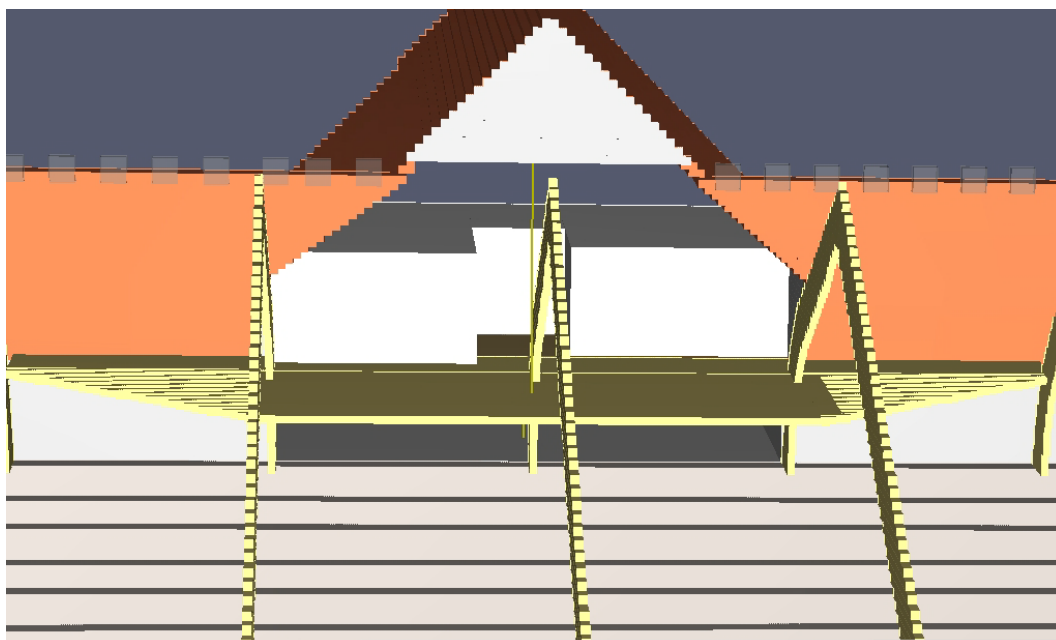
För måttangivelser för den modell av Bökebergs Arena som använts vid simuleringarna i FDS5 samt exempel på indatafil, se Bilaga B. Simuleringsuppställningens indatafil genererades med hjälp av datorprogrammet PyroSim [39].

I figur 5.1 visas modellen av Bökebergs Arena i FDS5.



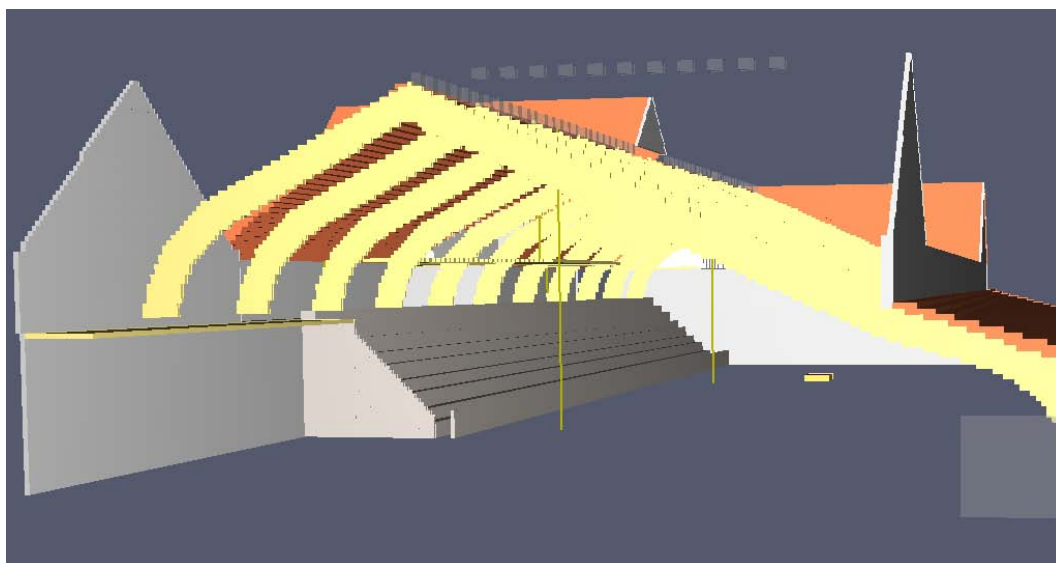
**Figur 5.1.** Visar modellen av Bökebergs Arena i FDS5. I figuren har delar av taket gjorts osynliga för att kunna se in i arenan.

I figuren har delar av taket och ena kortsidan gjorts osynliga för att kunna se in i arenan. I figuren syns de speciella limträbalkar som finns på Bökebergs Arena, där taket som gjorts osynligt följer dessa balkar. Balkarna utgör således hinder vilket innebär att brandgaserna inte kan spridas i sidled utan att först fylla utrymmet mellan två balkar. Vid den mittersta "huskroppen" skymtar balkongen som tillhör restaurangen på andra våningen. Denna del har förstörats upp och visas i figur 5.2. I figur 5.2 syns även de tre rätblock som symboliserar restaurangdelen på andra våningen.



**Figur 5.2.** Visar balkongen och restaurangen på andra våningen. Restaurangen symboliseras av tre rätblock som är markerad med vit färg i figuren.

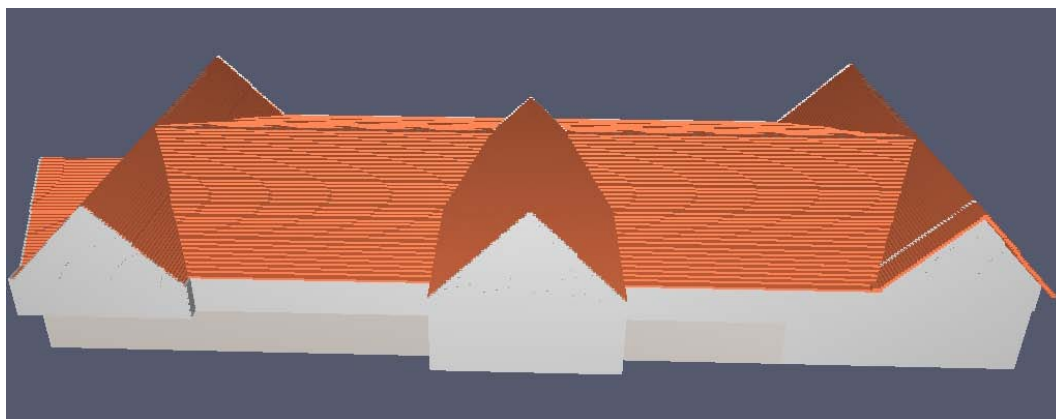
I figur 5.3 visas modellen av Bökebergs Arena i FDS5 sett från sidan.



**Figur 5.3.** Visar modellen av Bökebergs Arena i FDS5 från sidan. I figuren har ena kortsidan och delar av taket gjorts osynliga för att kunna se in i arenan. Överst i figuren syns 11 hål för brandgasventilation som sitter på den tvärgående, i figuren osynliga, takkonstruktionen. Liknande hål för brandgasventilation finns på taknocken som i figuren ligger längst bort. I figuren skymtar dessutom hålen för brandgasventilation på taknocken som löper parallellt med läktaren. I figuren syns även brandens placering.

I figuren har ena kortsidan samt delar av taket gjorts osynliga för att kunna se in i arenan. Överst i figuren syns hålen för brandgasventilationen som finns på byggnaden. I figuren syns även brandens placering på manegen. I figur 5.4 visas framsidan av modellen i FDS5 för Bökebergs Arena. Figuren visar den utvändiga uppbyggnaden med alla takkonstruktioner synliga.

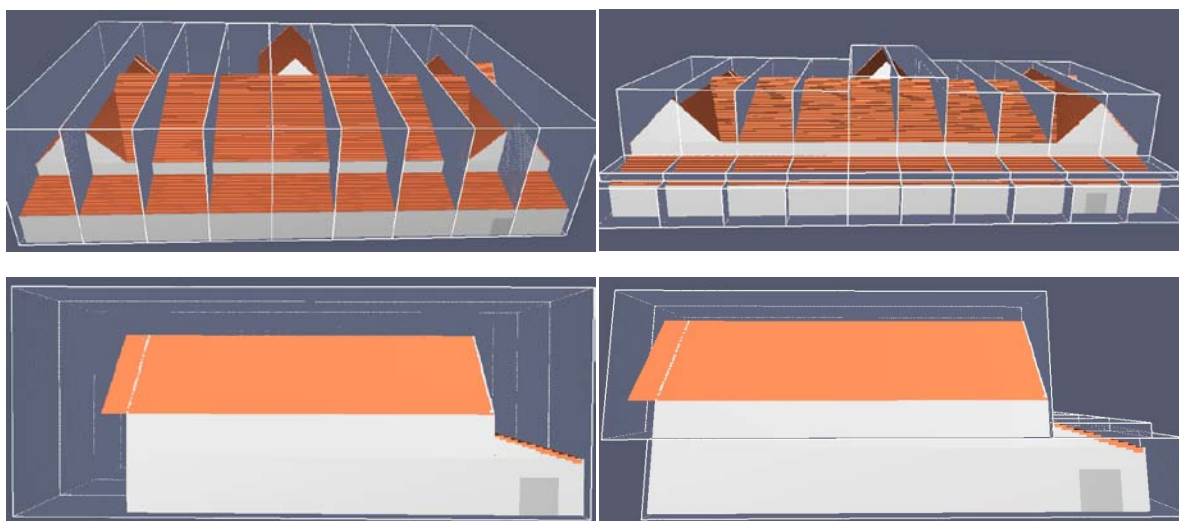




Figur 5.4. Visar framsidan av modellen i FDS5 för Bökebergs Arena.

## 5.2 Mesh-indelning

Två olika alternativ på indelningen av programmets beräkningsdomän användes vid simuleringarna. Detta för att dels testa möjligheten att minska beräkningstiderna, dels för att se om indelningen av beräkningsdomänen påverkar resultatet. De två olika alternativen, i rapporten kallad 9MESH och Optimalmesh, visas i figur 5.5.



Figur 5.5. Visar mesh-indelningen som använts i modellen i FDS5 av Bökebergs Arena. Till vänster visas 9MESH, ovanifrån respektive från sidan och till höger visas Optimalmesh. Som synes är 9MESH indelade i nio lika stora beräkningsdomäner, medan Optimalmesh är indelade i tio stycken sektioner i horisontell led och tre stycken sektioner vertikalt. För 9MESH har nio processorer använts vid beräkningarna och för optimalmesh har tio stycken processorer använts vid beräkningarna.

9MESH är indelade i nio lika stora beräkningsdomäner, där ingen uppdelning har skett vertikalt. Optimalmesh är indelad i tio stycken sektioner i horisontell led och tre stycken sektioner vertikalt, totalt 30 stycken beräkningsdomäner. Vid simuleringarna har nio processorer använts för 9MESH och tio processorer för Optimalmesh, där varje processor beräknar en horisontell sektion. För 9MESH och cellstorleken 20 cm innebar detta 1,2 miljoner celler per processor. För Optimalmesh och cellstorleken 20 cm innebar detta 788 400 celler per processor för alla processorer utom de två vid huskropp del B som hade 890 880 celler per processor.



## 6 Simuleringar med flamspridningsberäkningar

---

Följande kapitel redovisar metoder för att kunna använda flamspridningsberäkningar i FDS5. Först redovisas metoden som använts i Gpyro för att ta fram materialparametrar för fem olika trämaterial som testats i konkalorimeter (ISO5660). Därefter redovisas ett antal simuleringar som gjorts för att utvärdera resultatet från Gpyro och undersöka hur bra FDS5 kan beräkna flamspridning. Dessa simuleringar är av två olika experimentscenarion, det första är ett flamspridningsförsök gjort av SP enligt rapport av Blomqvist och van Hees [16] och det andra är ISO 9705 Room-Corner test [17].

### 6.1 Gpyro och Gpyro Property Estimation Program

Följande avsnitt redovisar den metod som använts samt de inställningar som gjorts i Gpyro och Gpyro Property Estimation Program vid framtagandet av materialparametrar för fem olika trämaterial som testats i konkalorimetern (ISO5660). Dessutom redovisas den modell av konkalorimetern i FDS5 som använts för att kontrollera materialegenskaperna för de material som tagits fram.

#### 6.1.1 Experimentdata

För att testa hur väl Gpyros materialparameteroptimering fungerar valdes fem olika trämaterial ut:

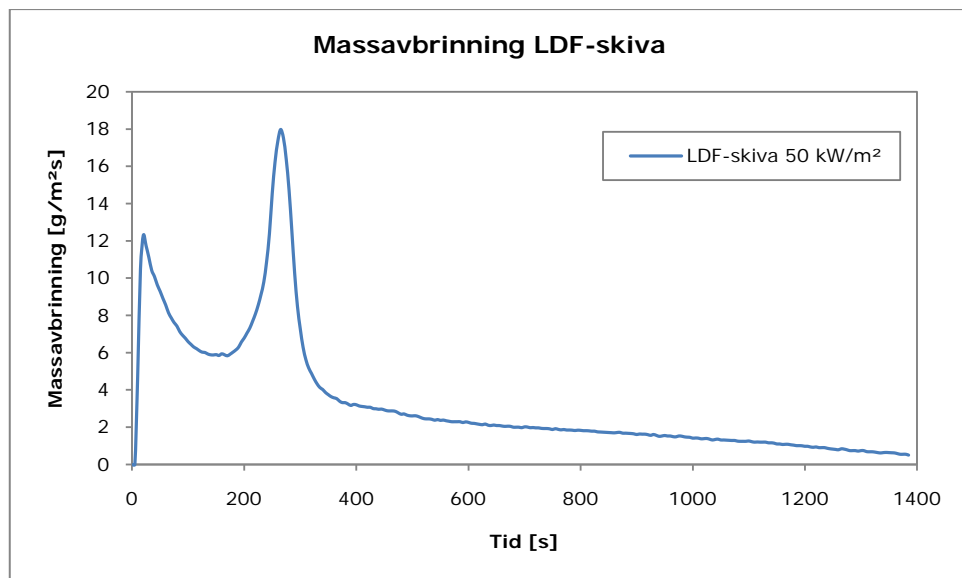
- LDF-skiva (Low Density Fiber-board)
- MDF-skiva (Medium Density Fiber-board)
- Spånskiva (particle board)
- Plywood (plywood)
- Gran (spruce)

Trämaterialen valdes ut för att de senare skulle kunna användas vid de dimensionerande brandscenarierna som identifierades för Bökebergs Arena, se kapitel 4. För dessa trämaterial fanns experimentdata från bland annat konkalorimetern (ISO5660) på SPs Fire Database [40]. För MDF-skiva, plywood och gran fanns försök med flera olika strålningsintensiteter tillgängliga, medan för spånskiva och LDF-skiva fanns endast ett försök tillgängligt. Experimenten saknar ofta uppmätta värden på massavbrinningen (mass loss rate,  $g/m^2s$ ) och där uppmätta värden finns så fluktuerar dessa. Därför användes effektutvecklingen (heat release rate,  $kW/m^2$ ) för att beräkna massavbrinningen med hjälp av den i försöket angivna  $\Delta H_c$ . Massavbrinningen beräknades enligt:

$$MLR = \frac{HRR}{\Delta H_c} \quad (6.1)$$

där  $MLR$  = massavbrinning [ $g/m^2s$ ],  $HRR$  = effektutveckling [ $kW/m^2$ ] och  $\Delta H_c$  = förbränningsvärme [ $kJ/g$ ]. Temperatur eller kontinuerliga mätningar av materialets tjocklek fanns inte tillgängliga. Därför användes massavbrinningen och total massavbrinning, vilken programmet beräknar själv från massavbrinningen, som optimeringsvillkor.

Ett exempel på massavbrinning som beräknats från effektutvecklingen hos ett experiment med LDF-skiva redovisas i figur 6.1. För att få en lösning som framförallt överensstämmer med den första och andra toppen på experimentkurvan, sattes optimeringsvillkoretiden,  $t_{stop}$ , till strax efter den andra toppen på kurvan. För figur 6.1 skulle det innebära att  $t_{stop}$  sattes till cirka 400 sekunder.



**Figur 6.1.** Exempel på experimentdata som använts till indata i Gpyro Property Estimation Program.

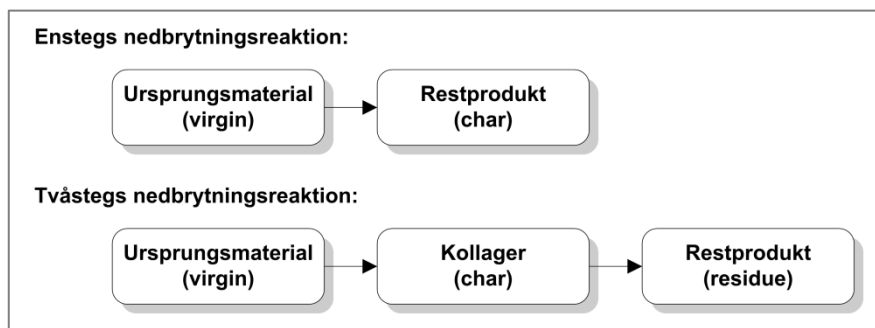
En sammanfattning av de experiment som använts till indata i Gpyro Property Estimation Program visas i tabell 6.1.

**Tabell 6.1.** Sammanfattning av experiment hämtade från SP Fire Database [40] vilka använts till indata i Gpyro Property Estimation Program. Densitet, tjocklek och area är testmaterialets fysiska egenskaper. Försöksnummer är SPs referensnummer för försöket.

Ämne	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tjocklek [mm]	Area [m <sup>2</sup> ]	Försöksnr	Strålningsintensitet [kW/m <sup>2</sup> ]
LDF-skiva	250	12	0,0088	269	50
MDF-skiva	700	12	0,0088	241	50
				243	50
				246	40
Spånskiva	700	12	0,0088	266	50
Plywood	600	12	0,01	94	25
				96	35
				100	50
Gran	450	10	0,0088	242	50
				245	50
				247	40
				250	40

### 6.1.2 Inställningar Gpyro Property Estimation Program

För att använda Gpyro Property Estimation Program måste en del antaganden om material-sammansättning och vilka reaktioner som materialet genomgår göras. För alla material testades både en enstegs- och en tvåstegs-nedbrytningsreaktion. Principen för en enstegs- och en två-stegsreaktion visas i figur 6.2.



Figur 6.2. Visar principen för en enstegs- och en tvåstegs-nedbrytningsreaktion.

Materialen definierades således så att pyrolys sker från ett ursprungsmaterial (virgin) till ett mellanläge i form av ett kollager (char) och sedan nedbrytning till restmaterial (residue) alternativt en direkt nedbrytning till restmaterial. Den reaktion som gav bäst resultat i jämförelse med experimentet valdes senare att testas i FDS5. De materialparametrar som var okända och som bedömdes ha stor betydelse för materialets pyrolysegenskaper angavs som optimeringsparametrar. Antalet okända parametrar skiljde beroende på antalet nedbrytningsreaktioner. De parametrar som användes för optimering redovisas och förklaras i tabell 6.2.

Tabell 6.2. Redovisning och förklaring av de parametrar som angetts som optimeringsparametrar i Gpyro Property Estimation Program. För utförligare beskrivning av parametrarnas betydelse, se Gpyro User's Guide [27] samt Gpyro Technical Reference Guide [28].

Parameter	Typ	Enhet	Betydelse
K0Z	Materialparameter	W/mK	Termisk konduktivitet i z-led för materialet.
C0	Materialparameter	J/kgK	Specifik värmekapacitet för materialet.
EMIS	Materialparameter	-	Emissiviteten för materialet.
R0	Materialparameter	kg/m <sup>3</sup>	Densiteten för materialet.
NKZ	Materialparameter	-	Påverkar temperaturberoendet för den termiska konduktiviteten enligt: $k(T) = k_0(T/T_r)^{NKZ}$ där $k_0$ är termisk konduktivitet vid referenstemperaturen $T_r$
Z	Reaktionsparameter	s <sup>-1</sup>	Pre-exponentiell faktor för reaktionen.
E	Reaktionsparameter	kJ/mol	Aktiveringsenergi för reaktionen.
ORDER	Reaktionsparameter	-	Reaktionsordning för reaktionshastigheten enligt: $\frac{d\alpha}{dt} = Z \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \alpha)^{ORDER}$ där $\alpha$ är omvandlingen, R är den allmänna gaskonstanten och T är temperaturen.
DHV	Reaktionsparameter	J/kg	Förångningsentalpi för reaktionen.

De parametrar som valdes för optimering vid enstegs-nedbrytningsreaktion redovisas i tabell 6.3 och för två-stegsreaktion i tabell 6.4. För alla parametrar sattes sannolikheten för att muteras till 0,05 ( $P_{mut} = 0,05$ ), styrkan vid mutation till 1,0 ( $V_{mutmax} = 1$ ) och inga parametrar angavs vara korrelerade vid reproduktion ( $IvarPair = 0$ ).

**Tabell 6.3.** Sammanfattning av optimeringsparametrar för *enstegs nedbrytningsreaktion* i Gpyro Property Estimation Program samt respektive parameters min- och maxvärde. Log anger om min- och maxvärdet är logaritmerat (.TRUE.) eller inte (.FALSE.). Materialet som parametern tillhör redovisas i kolumnen Material 1. Virgin motsvarar ursprungsmaterialet, antingen LDF-skiva, MDF-skiva, spånskiva, plywood eller gran. För vissa parametrar är min- och maxvärdet beroende på ett annat materials värde, vilket indikeras med ett minustecken framför min- och maxvärdet. Då står min- och maxvärdet för fraktionen av Material 2s värde. För förklaring av respektive parameter, se tabell 6.2.

Material 1	Material 2	Parameter	MinVal	MaxVal	Log
Virgin		K0Z	0,01	0,3	.FALSE.
Virgin		C0	1000	2500	.FALSE.
Virgin		EMIS	0,6	0,9	.FALSE.
Char	Virgin	K0Z	-1,0	-0,6	.FALSE.
Char		NKZ	1,0	2,0	.FALSE.
Char		C0	1000	2500	.FALSE.
Char	Virgin	R0	-0,10	-0,05	.FALSE.
Char		EMIS	0,95	0,98	.FALSE.
Reaktion					
Från (material 1)	Till (material 2)	Parameter	MinVal	MaxVal	Log
Virgin	Char	Z	7,0	8,5	.TRUE.
Virgin	Char	E	130	150	.FALSE.
Virgin	Char	ORDER	1,0	2,0	.FALSE.
Virgin	Char	DHV	5,3	5,8	.TRUE.

**Tabell 6.4.** Sammanfattning av optimeringsparametrar för *två-stegsreaktion* i Gpyro Property Estimation Program samt respektive parameters min- och maxvärde. Materialet som parametern tillhör redovisas i kolumnen Material 1. Virgin motsvarar ursprungsmaterialet, antingen LDF-skiva, MDF-skiva, spånskiva, plywood eller gran. För vissa parametrar är min- och maxvärdet beroende på ett annat materials värde, vilket indikeras med ett minustecken framför min- och maxvärdet. Då står min- och maxvärdet för fraktionen av Material 2s värde. För förklaring av respektive parameter, se tabell 6.2.

Material 1	Material 2	Parameter	MinVal	MaxVal	Log
Virgin		K0Z	0,01	0,3	.FALSE.
Virgin		C0	1000	2500	.FALSE.
Virgin		EMIS	0,6	0,9	.FALSE.
Char	Virgin	K0Z	-1,0	-0,6	.FALSE.
Char		NKZ	1,0	2,0	.FALSE.
Char		C0	1000	2500	.FALSE.
Char	Virgin	R0	-0,40	-0,05	.FALSE.
Char		EMIS	0,7	1,0	.FALSE.
Residue	Char	K0Z	-1,0	-0,10	.FALSE.
Residue		NKZ	1,0	2,0	.FALSE.
Residue		C0	1000	2500	.FALSE.
Residue	Char	R0	-0,80	-0,05	.FALSE.
Residue		EMIS	0,75	1,0	.FALSE.
Reaktion					
Från (material 1)	Till (material 2)	Parameter	MinVal	MaxVal	Log
Virgin	Char	Z	7,0	10,0	.TRUE.
Virgin	Char	E	100	150	.FALSE.
Virgin	Char	ORDER	0,5	2,0	.FALSE.
Virgin	Char	DHV	4,0	6,0	.TRUE.
Char	Residue	Z	8,0	11,0	.TRUE.
Char	Residue	E	150	200	.FALSE.
Char	Residue	ORDER	0,5	2,0	.FALSE.
Char	Residue	DHV	4,0	6,0	.TRUE.

Övriga parametrar som skiljer sig från programmets standardvärden och som är särskilt intressanta redovisas i tabell 6.5.

**Tabell 6.5.** Sammanställning av parametrar som har ändrats från Gpyro Property Estimation Programs standardinställningar. Parametrarna är indelade under vilken flik i den medföljande Excel-filen, som används för att skapa indatafiler till programmet, som inställningen av parametern görs.

<b>General</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Betydelse</b>
<b>FDSMODE</b>	.TRUE.	Använder samma pyrolysmo­dell som FDS.
<b>TAMB</b>	293	Sätter omgivningstemperatur till 293 K (20°C).
<b>Qe</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Betydelse</b>
<b>Ncell,z</b>	121; 101	Anger antalet celler i z-led (djupled). 121 användes för material med tjocklek 12 mm och 101 för material med tjocklek 10 mm.
<b>hc</b>	15	Sätter värmeövergångstalet vid ytan av materialet till 15 W/m <sup>2</sup> K
<b>qfl</b>	15000	Sätter strålning från flamman efter antändning till 15 kW/m <sup>2</sup> .
<b>GA_GenInput</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Betydelse</b>
<b>NGEN</b>	200	Antal generationer som ska beräknas.
<b>NINDIV</b>	500	Antal individer i populationen.
<b>MAXCOPIES</b>	12	Maximalt antal kopior av en individ.
<b>FITEXPONENT</b>	3	Exponent för hur väl lösningen stämmer med experimenten.
<b>WHOLEGENFRAC</b>	0,8	Fraktionen av avkommans gener som inte är linjär kombination av föräldrarnas gener.
<b>GA_phi</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Betydelse</b>
<b>Φ</b>	1	Hur stor betydelse respektive mätdata har för lösningen.
<b>ε</b>	0,01;0,05	Litet tal för att förhindra att lösningens värde närmar sig oändligheten då lösningen är väldigt nära experimentet. 0,01 användes för massavbrinning och 0,05 för total massavbrinning.

När Gpyro Property Estimation Program körts färdigt användes materialparametrarna på den mest optimala lösningen för att köra en simulering i Gpyro. Detta gjordes dels för att testa att lösningen stämmer med vad Gpyro Property Estimation Program beräknat, dels för att få en FDS-indatafil med färdiga MATL-rader för respektive material. Därefter användes en egen modell av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5 för att testa att materialet verkligen ger liknande resultat som experimentet i FDS5. För en utförligare genomgång av simuleringsinställningar av Gpyro och Gpyro Property Estimation Program, se Bilaga C.



### 6.1.3 Modell av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5

En väldigt enkel modell av konkalorimetern (ISO 5660) [15] användes för att kontrollera hur materialet som framtagits med hjälp av Gpyro Property Estimation Program beter sig i FDS5. Materialet representeras i modellen av en yta som utsätts för en extern strålning motsvarande experimentets strålningsintensitet. Massavbrinning och effektutveckling från simuleringarna jämförs sedan med experimentet.

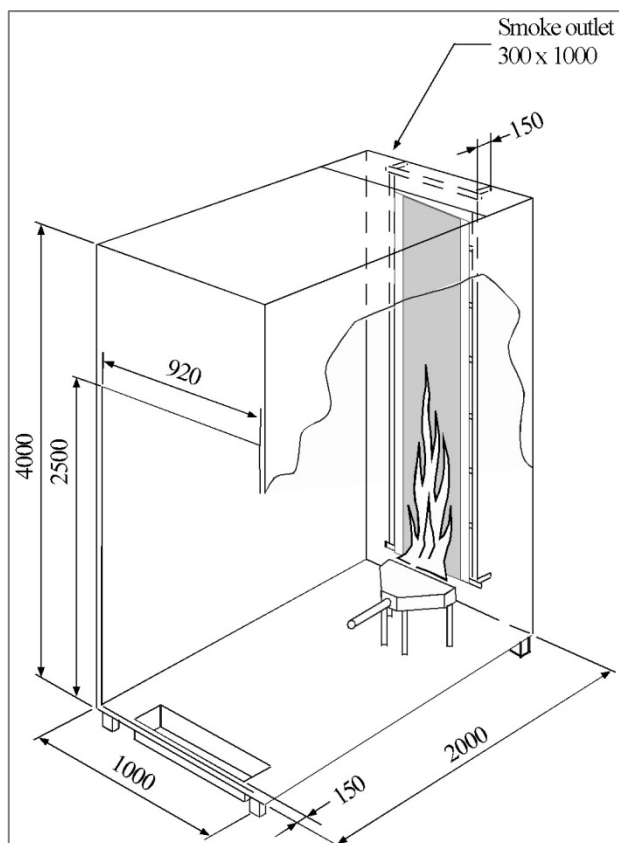
Eftersom tanken är att de framtagna materialparametrarna ska kunna användas i flamspridningsberäkningar i fullskala, är det viktigt att massavbrinning och effektutveckling överrensstämmer även efter antändning då en flamma finns närvarande och ger en återstrålning mot materialet. Därför var möjligheten till förbränning aktiverad. Inte heller definierades något fast värmeövergångstal. Detta sätt att testa ett materials egenskaper skiljer sig mot förslaget i FDS User's Guide [4], där de sätter ett fast värmeövergångstal och en syrgashalt som omöjliggör förbränning. Att tillåta förbränning och låta FDS5 beräkna värmeövergångstal och återstrålning från flamman gör det svårare att få resultat som överrensstämmer med experimenten, men det ger en bättre indikation på hur bra materialparametrarna och förbränningsreaktionen beskriver materialet i fullskala.

För exempel på indata-fil till FDS5 av konkalorimetern (ISO5660), se Bilaga D.

## 6.2 Simulering av flamspridningsexperiment SP

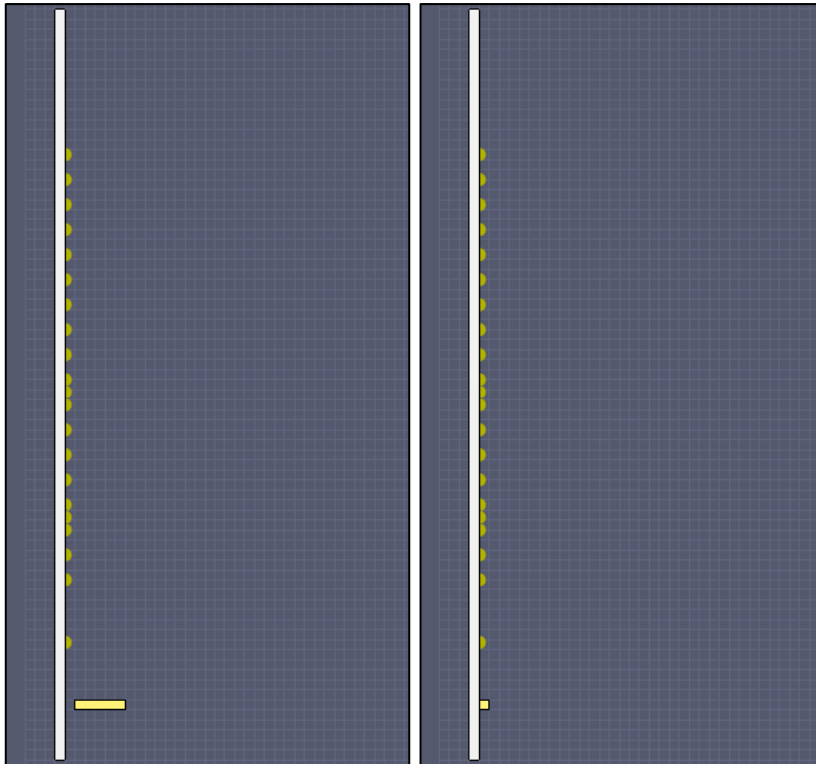
För att undersöka materialparametrarna samt FDS5s egenskaper vid flamspridningsberäkningar simulerades två olika flamspridningsförsök. Det ena experimentet är genomfört av Blomqvist och van Hees vid SP [16] och det andra experimentet är ISO 9705 Room-Corner test [17].

För flamspridningsexperimentet hos SP fanns endast experimentdata för LDF-skiva och spånskiva tillgängligt. I experimentet testades 3 meter höga och 0,3 meter breda vertikala paneler av respektive material. En diffusionsbrännare med propan med effekten 20 kW placerades 5 cm från testmaterialets yta och 20 cm ovanför den nedre kanten på testmaterialet. Förutom effektutveckling mättes temperatur- och värmestrålning på flera ställen vid ytan av testmaterialet. För en schematisk skiss av experimentuppställningen, se figur 6.3. För detaljerad beskrivning av experimenten se rapport av Blomqvist och van Hees [16].



**Figur 6.3.** Schematisk skiss över experimentuppställningen för flamspridningsexperimentet av SP. Från Blomqvist och van Hees [16].

I modellen av experimentet i FDS5 gjordes simuleringar med två olika typer av brännare. Det första alternativet var en brännare med en vertikal brännaryta som placerades 4 cm från testmaterialet och det andra alternativet var en brännare med en horisontell brännaryta som placerades alldeles intill testmaterialet. Brännarnas placering i de olika simuleringarna visas i figur 6.4.



**Figur 6.4.** Visar brännarens placering i de olika simuleringarna. Till vänster den vertikala brännaren med brännarytan 4 cm från testmaterialet. Till höger den horisontella brännaren som ligger alldeles intill testmaterialet

Båda brännarna placerades 20 cm ovanför den nedre kanten på testmaterialet. För brännaren med den vertikala brännarytan testades två olika strålningsfraktioner för propan, 0,3 respektive 0,4. För brännaren med horisontell brännaryta testades bara strålningsfraktionen 0,3.

Simuleringar med tre olika cellstorlekar gjordes för varje brännaralternativ: 4 cm, 2 cm respektive 1 cm celler. För exempel på indata-fil i FDS5, se Bilaga E.

### 6.3 Simulering av ISO 9705 Room-corner test

Simuleringar av ISO 9705 Room-Corner test [17] gjordes i FDS5 för samtliga fem trämaterial som framtagits av Gpyro Property Estimation Program. Resultaten från simuleringarna jämfördes sedan med experiment av ISO 9705 Room-Corner test hämtade från SP Fire Database [40].

För att testa grid-oberoende vid simuleringarna användes följande storlekar på cellerna: 4 cm, 8 cm, 16 cm och 32 cm. För exempel på indata-fil i FDS5 samt figur över simuleringssupställning, se Bilaga E.



## 7 Resultat

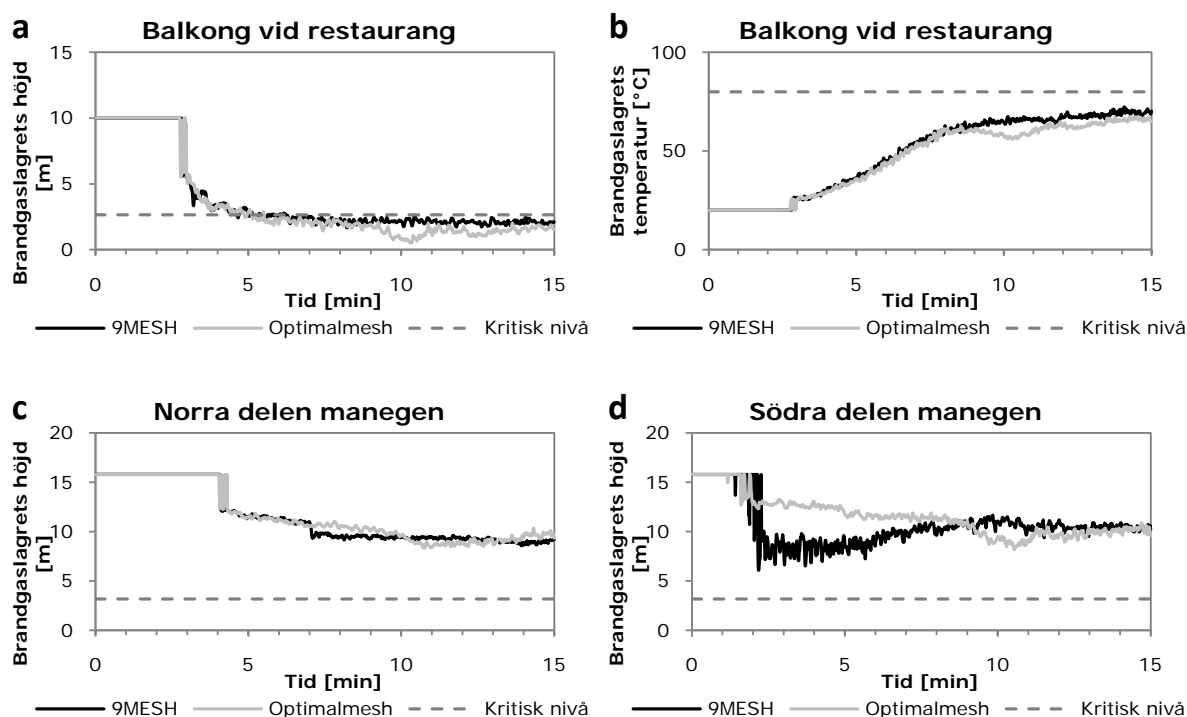
Följande kapitel redovisar resultat från simuleringarna av Bökebergs Arean utan flamspridningsberäkningar, resultat från Gpyro Property Estimation Program samt simuleringar med flamspridningsberäkningar i FDS5.

### 7.1 Simulering utan flamspridningsberäkningar

Tiden till kritiska förhållanden bedömdes enligt tiden det tar för brandgaslagrets höjd att nå ner till en kritisk nivå enligt Boverkets Byggregler, BBR [41] samt för temperaturen att överstiga den kritiska nivån enligt BBR [41]. Någon vidare undersökning av sikt i brandgaserna och strålning mot personer beräknades inte, då det faller utanför syftet med rapporten. För utförligare diskussion och analys av resultaten, se kapitel 8.

#### 7.1.1 Brand i monter

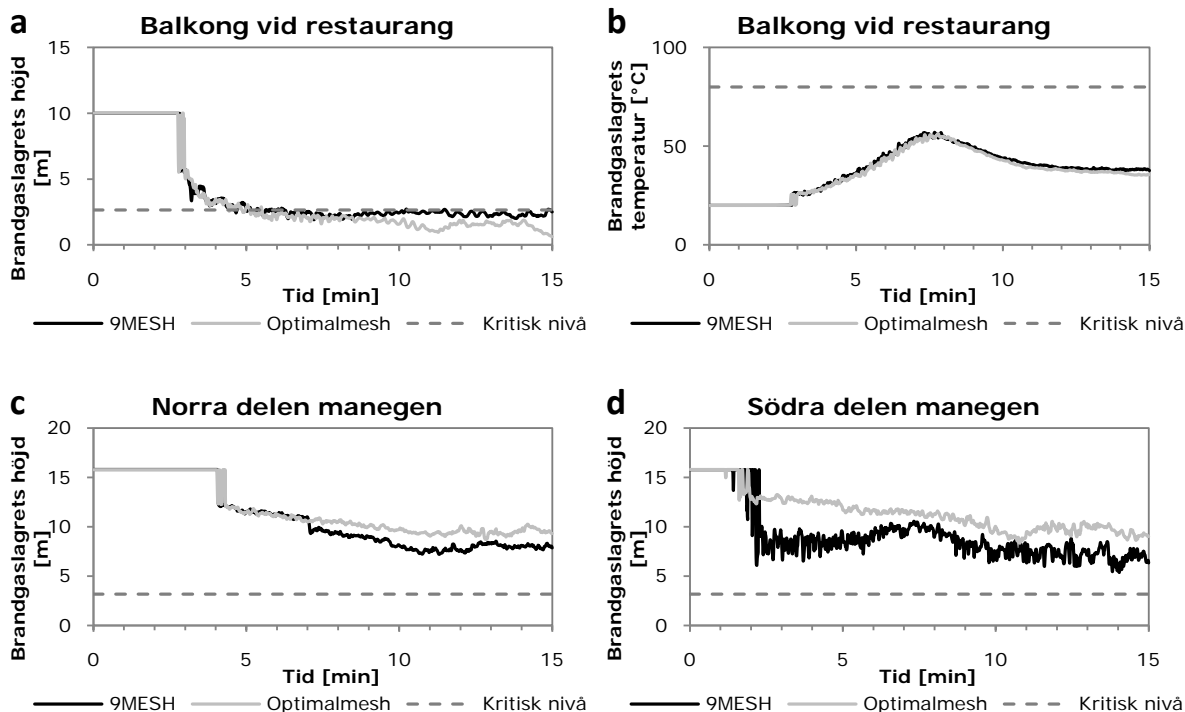
Resultaten från simuleringarna av Bökebergs Arena, brand i monter visas i figur 7.1. Som synes i figur 7.1a uppstår kritiska förhållanden med avseende på brandgaslagrets höjd på balkongen vid restaurangen efter cirka 5 minuter.



**Figur 7.1.** Resultat för simuleringar av Bökebergs Arena, brand i monter. (a) Brandgaslagrets höjd vid balkongen som tillhör restaurangen. (b) Brandgaslagrets temperatur vid balkongen som tillhör restaurangen. (c) Brandgaslagrets höjd vid den norra delen av manegen. (d) Brandgaslagrets höjd vid den södra delen av manegen.

### 7.1.2 Brand på scen

Resultaten från simuleringarna av Bökebergs Arena, brand på scen visas i figur 7.1. Som synes i Figur 7.2a uppstår kritiska förhållanden med avseende på brandgaslagrets höjd på balkongen vid restaurangen efter cirka 5 minuter.



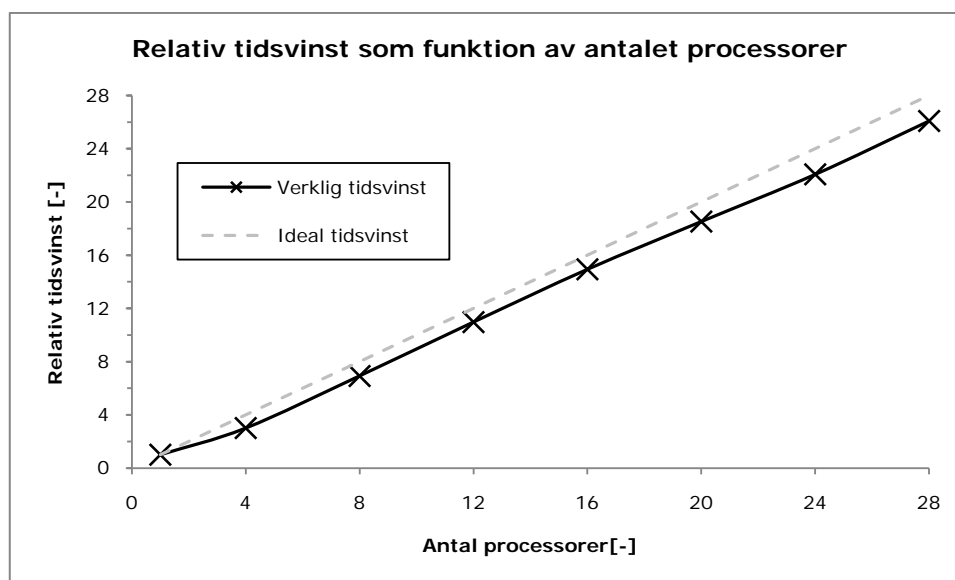
**Figur 7.2.** Resultat för simuleringar av Bökebergs Arena, brand på scen. (a) Brandgaslagrets höjd vid balkongen som tillhör restaurangen. (b) Brandgaslagrets temperatur vid balkongen som tillhör restaurangen. (c) Brandgaslagrets höjd vid den norra delen av manegen. (d) Brandgaslagrets höjd vid den södra delen av manegen.

## 7.2 Gpyro Property Estimation Program

Följande resultat erhöles från Gpyro Property Estimation Program. Först redovisas resultatet för ett test av parallellsimuleringar, därefter redovisas resultat för de olika trämaterialen LDF-skiva, MDF-skiva, spånskiva, plywood och gran. För utförligare diskussion och analys av resultaten, se kapitel 8.

### 7.2.1 Test av parallellsimulering

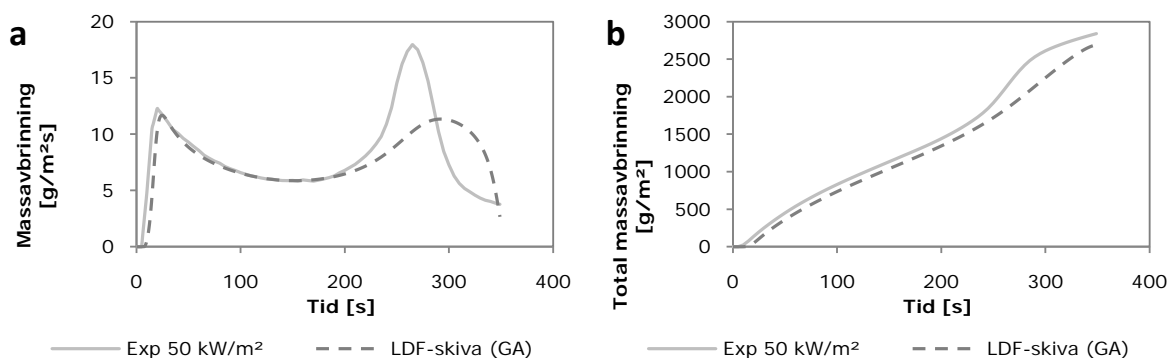
För att testa hur väl Gpyro Property Estimation Program verkligen fungerar vid parallellsimulering, gjordes ett antal simuleringar med en av de exempelfiler som följer med programmet: 10-char\_ga (exempel 10). Simuleringar gjordes med 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24 och 28 stycken processorer. Den faktiska tiden som det tog att simulera 100 generationer noterades därefter och den relativa tidsvinsten av att använda flera processorer beräknades. Resultatet från simuleringarna visas i figur 7.3. Som jämförelse kan nämnas att för en processor tog 100 generationer drygt 102 timmar att simulera, medan det för 28 processorer endast tog knappt fyra timmar att simulera samma antal generationer.



**Figur 7.3.** Relativ tidsvinst som funktion av antalet processorer för Gpyro Property Estimation Program. Som synes uppnås en relativ tidsvinst av att använda flera processorer som närapå följer den ideala, teoretiskt maximala tidsvinsten.

## 7.2.2 LDF-skiva

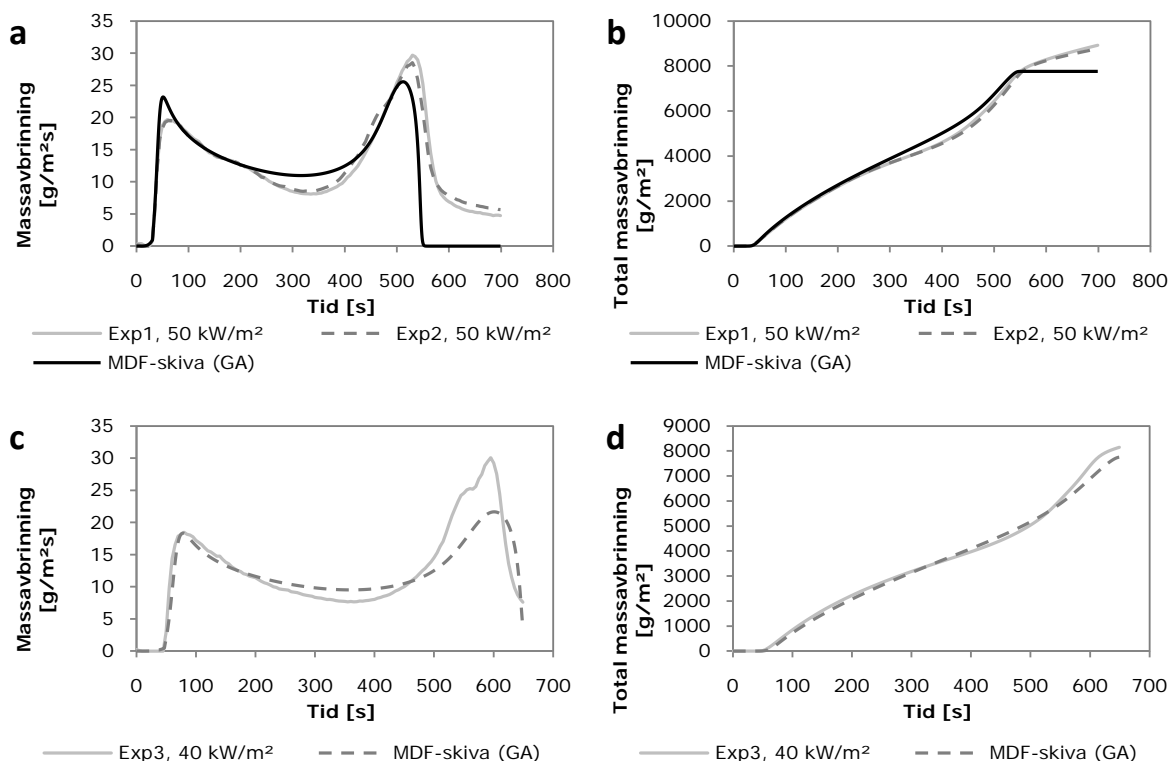
I figur 7.4 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från parameter-optimeringen för LDF-skiva.



**Figur 7.4.** Jämförelse mellan experimentdata och resultat från Gpyro Property Estimation Program för LDF-skiva, enstegs-nedbrytningsreaktion. (a) Massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Total massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

## 7.2.3 MDF-skiva

I figur 7.5 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från parameter-optimeringen för MDF-skiva.

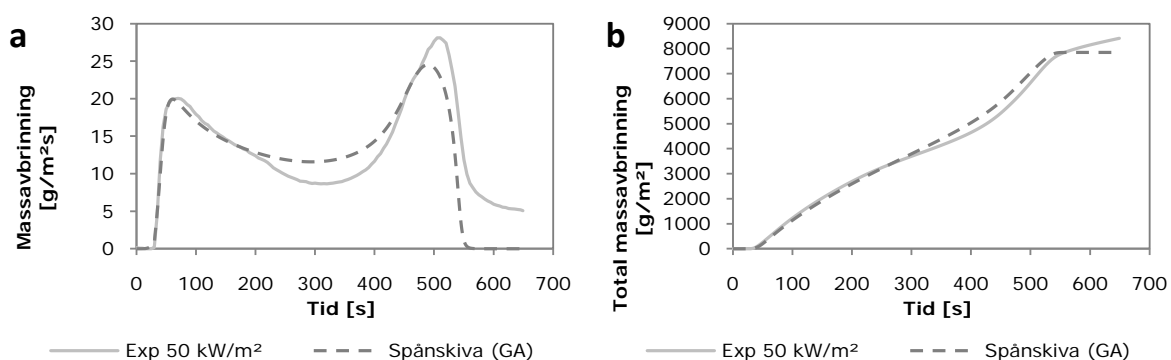


**Figur 7.5.** Jämförelse mellan experimentdata och resultat från Gpyro Property Estimation Program för MDF-skiva, enstegs-nedbrytningsreaktion. (a) Massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Total massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (c) Massavbrinning vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (d) Total massavbrinning vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.



## 7.2.4 Spånskiva

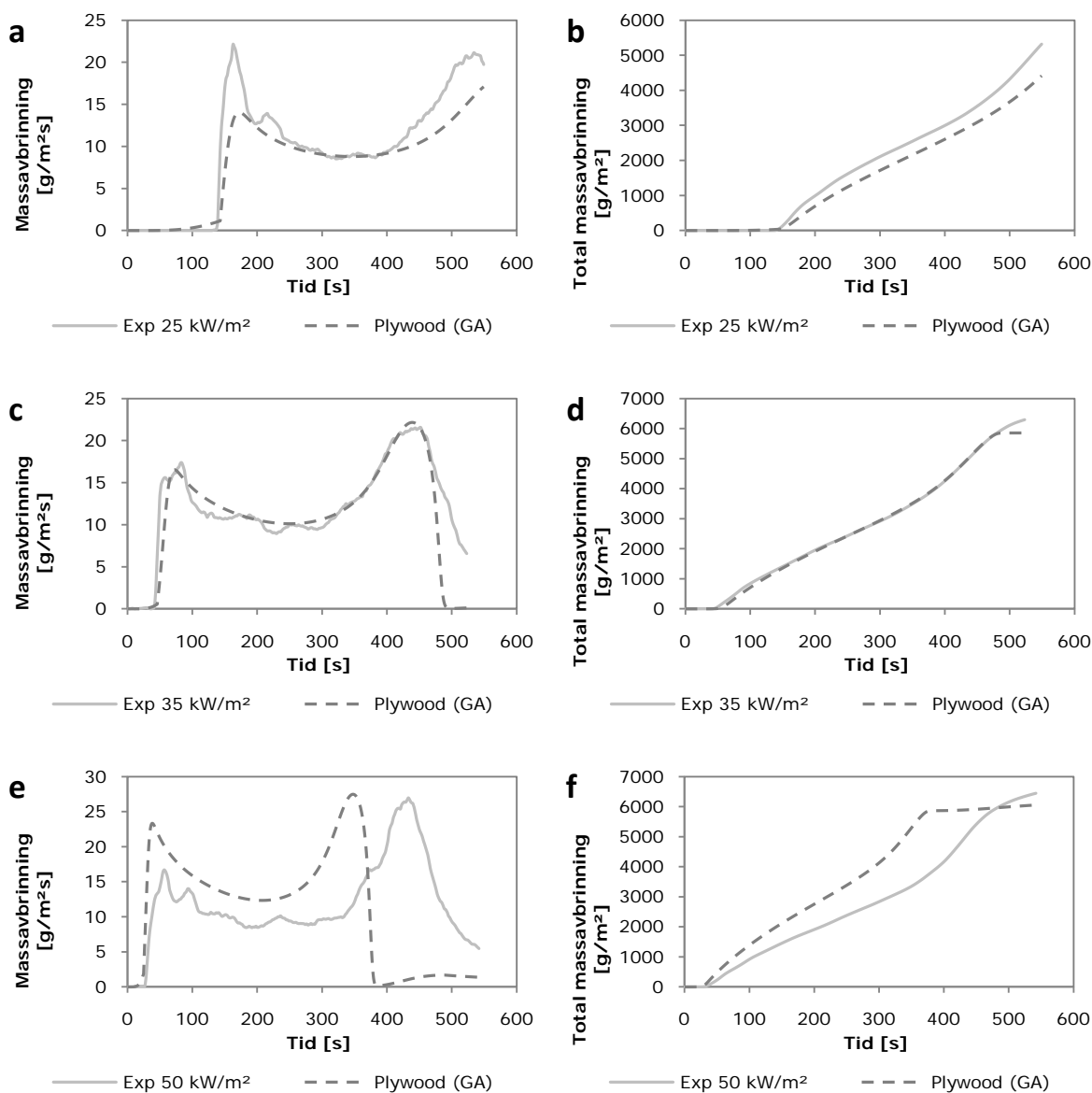
I figur 7.6 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från parameter-optimeringen för spånskiva.



**Figur 7.6.** Jämförelse mellan experimentdata och resultat från Gpyro Property Estimation Program för spånskiva, enstegs-nedbrytningsreaktion. (a) Massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Total massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

## 7.2.5 Plywood

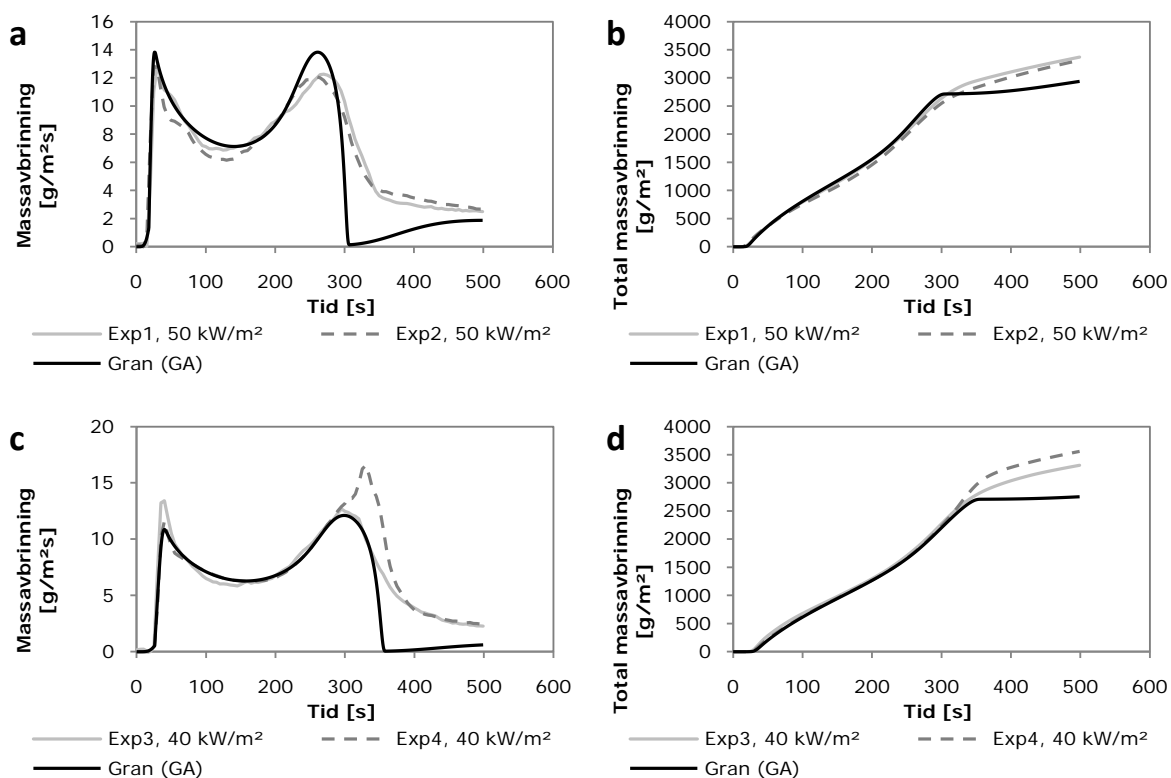
I figur 7.7 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från parameter-optimeringen för plywood.



**Figur 7.7.** Jämförelse mellan experimentdata och resultat från Gpyro Property Estimation Program för plywood, tvåstegs-reaktion. (a) Massavbrinning vid 25 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Total massavbrinning vid 25 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (c) Massavbrinning vid 35 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (d) Total massavbrinning vid 35 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (e) Massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (f) Total massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

## 7.2.6 Gran

I figur 7.8 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från parameter-optimeringen för gran.



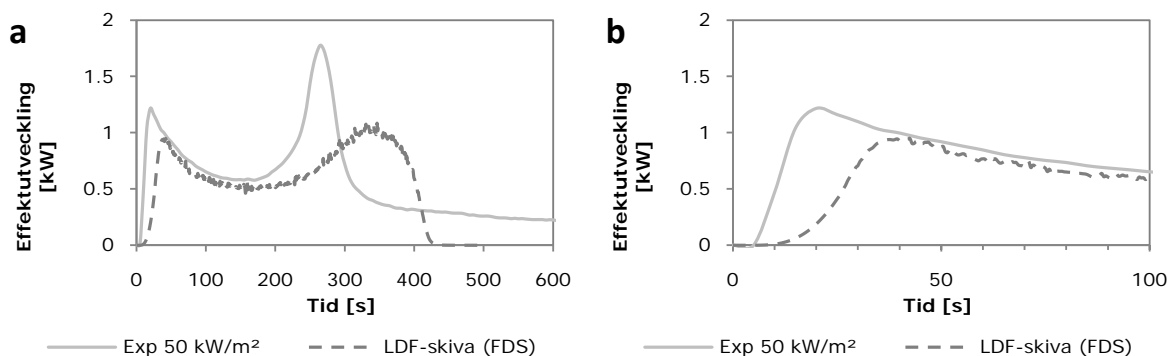
**Figur 7.8.** Jämförelse mellan experimentdata och resultat från Gpyro Property Estimation Program för gran, tvåstegs-reaktion. (a) Massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Total massavbrinning vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (c) Massavbrinning vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (d) Total massavbrinning vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

### 7.3 Konkallorimeter (ISO5660) FDS5

Med de materialparametrar som erhållits från Gpyro Property Estimation Program gavs följande resultat i FDS5 för modellen av konkallorimetern (ISO5660). För materialparametrar som använts till indata i modellen av konkallorimetern (ISO5660), se Bilaga F. För utförligare diskussion och analys av resultaten, se kapitel 8.

#### 7.3.1 LDF-skiva

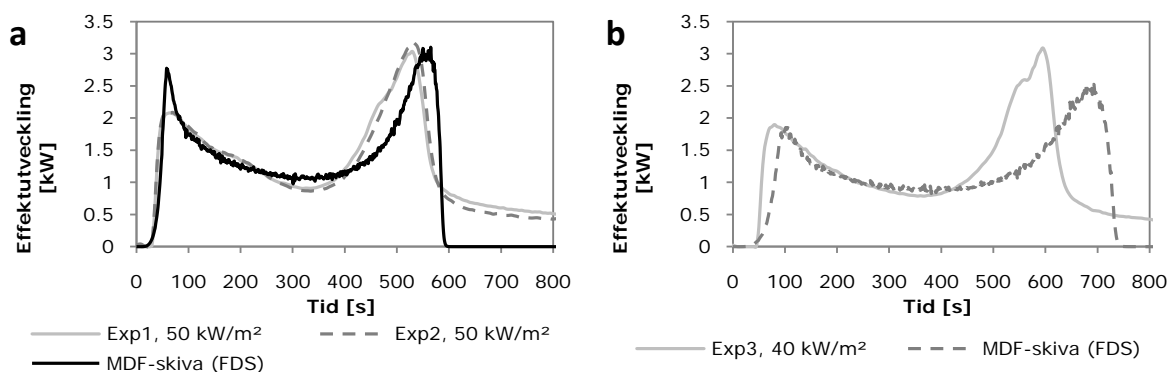
I figur 7.9 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från simulering av konkallorimetern i FDS5 för LDF-skiva.



**Figur 7.9.** Jämförelse mellan experimentdata i konkallorimetern och resultat från simulering av konkallorimetern i FDS5 för LDF-skiva. (a) Effektutveckling vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Samma diagram som (a) fast uppförstorat på de första 100 sekunderna.

#### 7.3.2 MDF-skiva

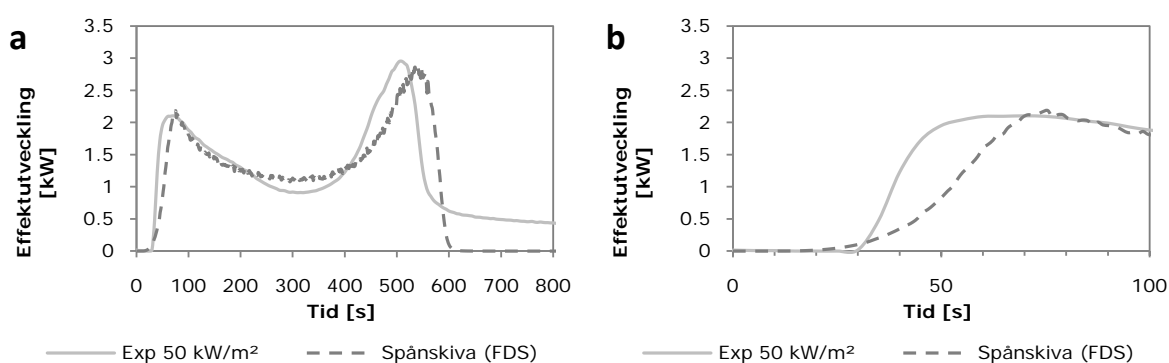
I figur 7.10 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från simulering av konkallorimetern i FDS5 för MDF-skiva.



**Figur 7.10.** Jämförelse mellan experimentdata i konkallorimetern och resultat från simulering av konkallorimetern i FDS5 för MDF-skiva. (a) Effektutveckling vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Effektutveckling vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

### 7.3.3 Spånskiva

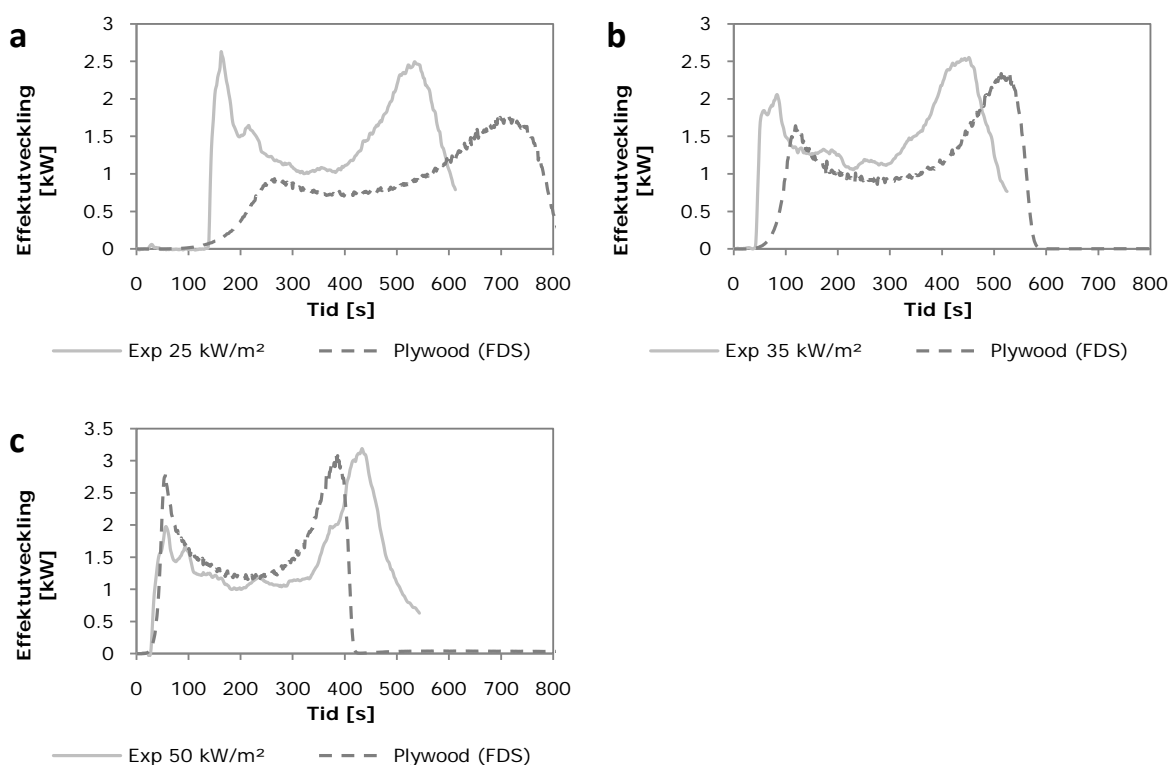
I figur 7.11 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från simulering av konkalorimetern i FDS5 för spånskiva.



**Figur 7.11.** Jämförelse mellan experimentdata i konkalorimetern och resultat från simulering av konkalorimetern i FDS5 för spånskiva. (a) Effektutveckling vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. Samma diagram som (a) fast uppförstorat på de första 100 sekunderna.

### 7.3.4 Plywood

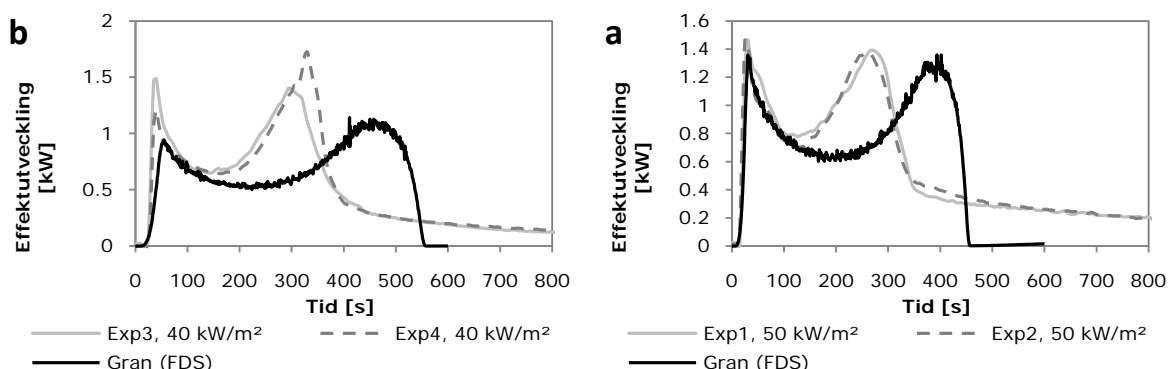
I figur 7.12 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från simulering av konkalorimetern i FDS5 för plywood.



**Figur 7.12.** Jämförelse mellan experimentdata i konkalorimetern och resultat från simulering av konkalorimetern i FDS5 för plywood. (a) Effektutveckling vid 25 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Effektutveckling vid 35 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (c) Effektutveckling vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

### 7.3.5 Gran

I figur 7.13 redovisas en jämförelse mellan experimentdata och resultatet från simulering av konkalorimetern i FDS5 för gran.



**Figur 7.13.** Jämförelse mellan experimentdata i konkalorimetern och resultat från simulering av konkalorimetern i FDS5 för gran. (a) Effekttutveckling vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet. (b) Effekttutveckling vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet.

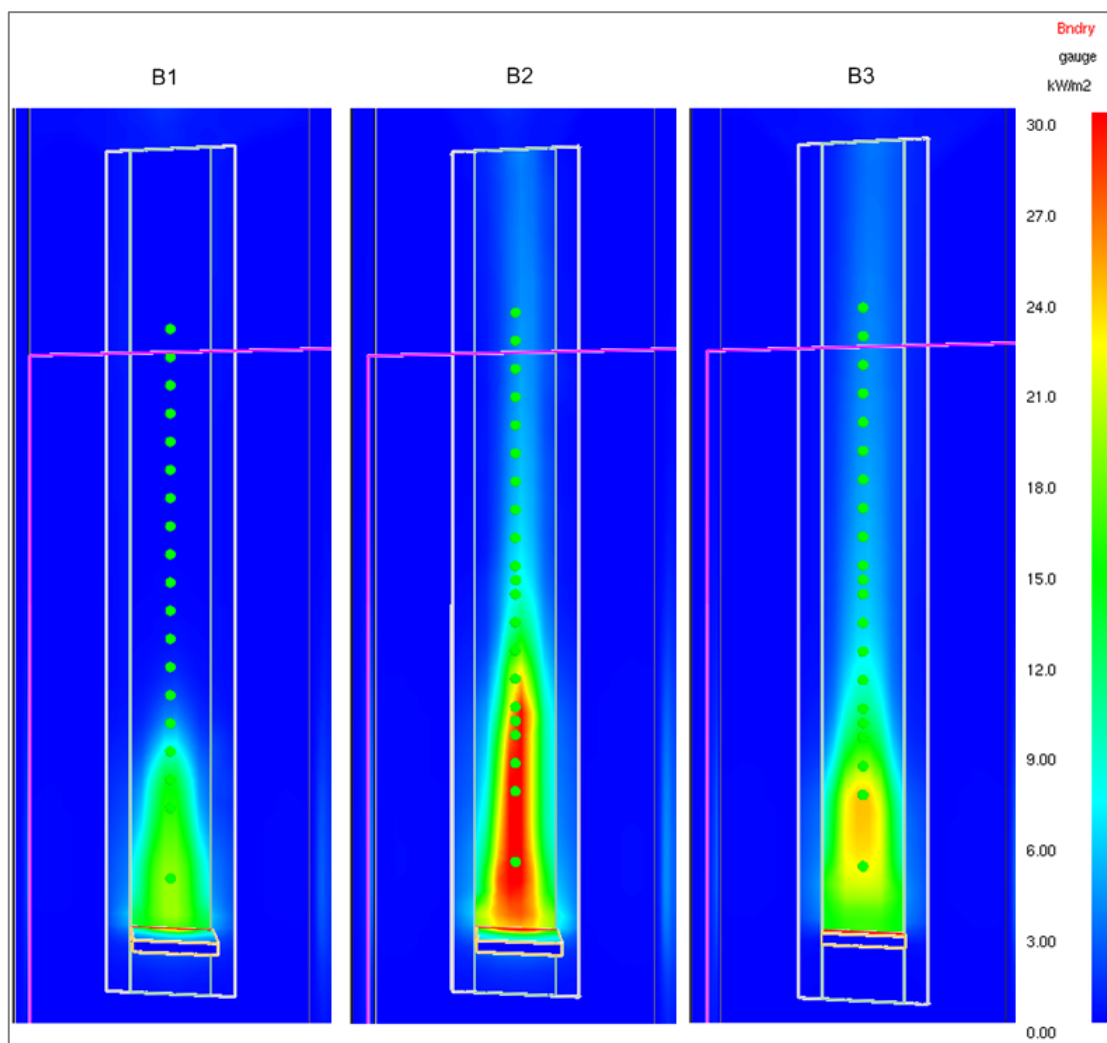
## 7.4 Simulering av flamspridningsexperiment SP

Resultatet från simuleringarna jämfördes med den i experimentet uppmätta effekttutvecklingen. Dessutom jämfördes materialets yttemperatur i simuleringarna med uppmätta temperaturer i experimentet på en bestämd höjd ovanför brännaren. För LDF-skiva jämfördes temperaturen vid 0,8 m ovanför brännaren och för spånskiva vid 0,7 m ovanför brännaren. De olika brännaralternativen och vilken strålningsfraktion som användes redovisas i tabell 7.1. Benämningen är den benämning på respektive simuleringssupställning som använts vid redovisning av resultaten.

**Tabell 7.1.** Sammanställning av de olika brännaralternativen och vilken strålningsfraktion som användes.

Typ av brännare	Strålningsfraktion [-]	Benämning
Vertikal brännare	0,3	B1
Vertikal brännare	0,4	B2
Horisontell brännare	0,3	B3

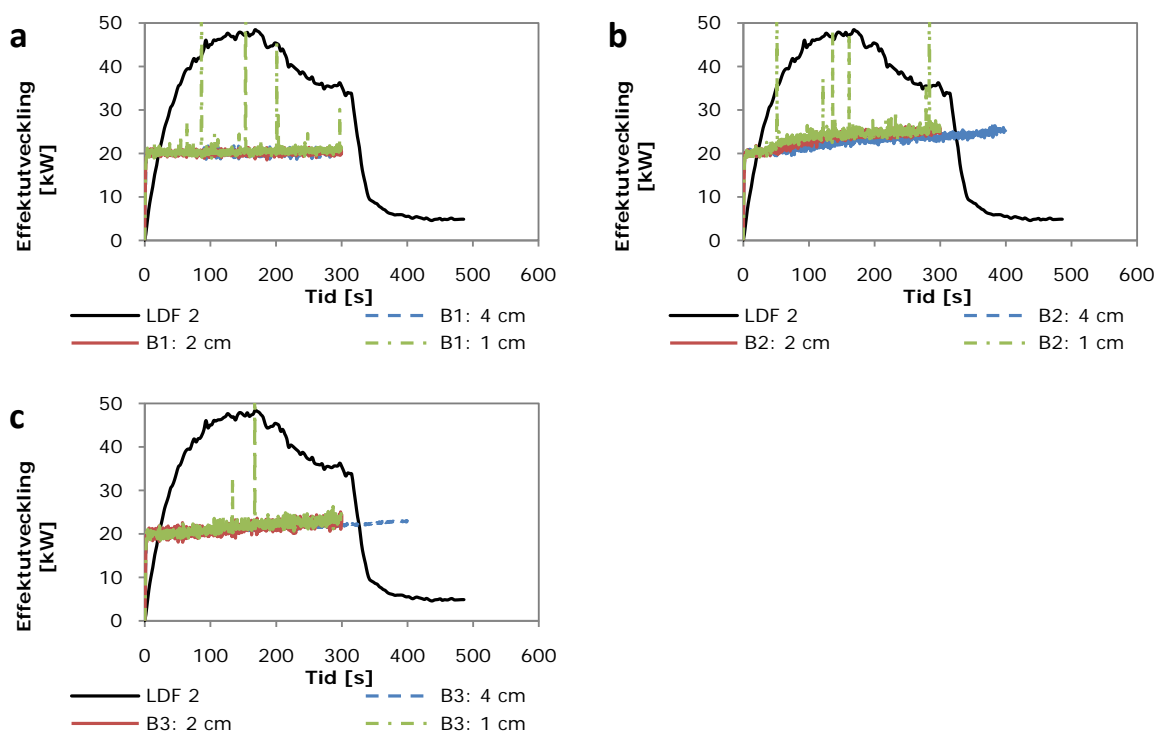
Simuleringstiden var 300 sekunder för alla simuleringar utom vid cellstorleken 4 cm för brännare B2 och B3, som simulerades i 400 sekunder. Värmetransport till testmaterialet vid 300 sekunder för de olika brännaralternativen visas i figur 7.14. För utförligare diskussion och analys av resultaten, se kapitel 8.



**Figur 7.14.** Totalt värmeflöde (gauge heat flux) mot testmaterialet vid 300 sekunder för de olika brännaralternativen B1, B2 och B3.

### 7.4.1 LDF-skiva

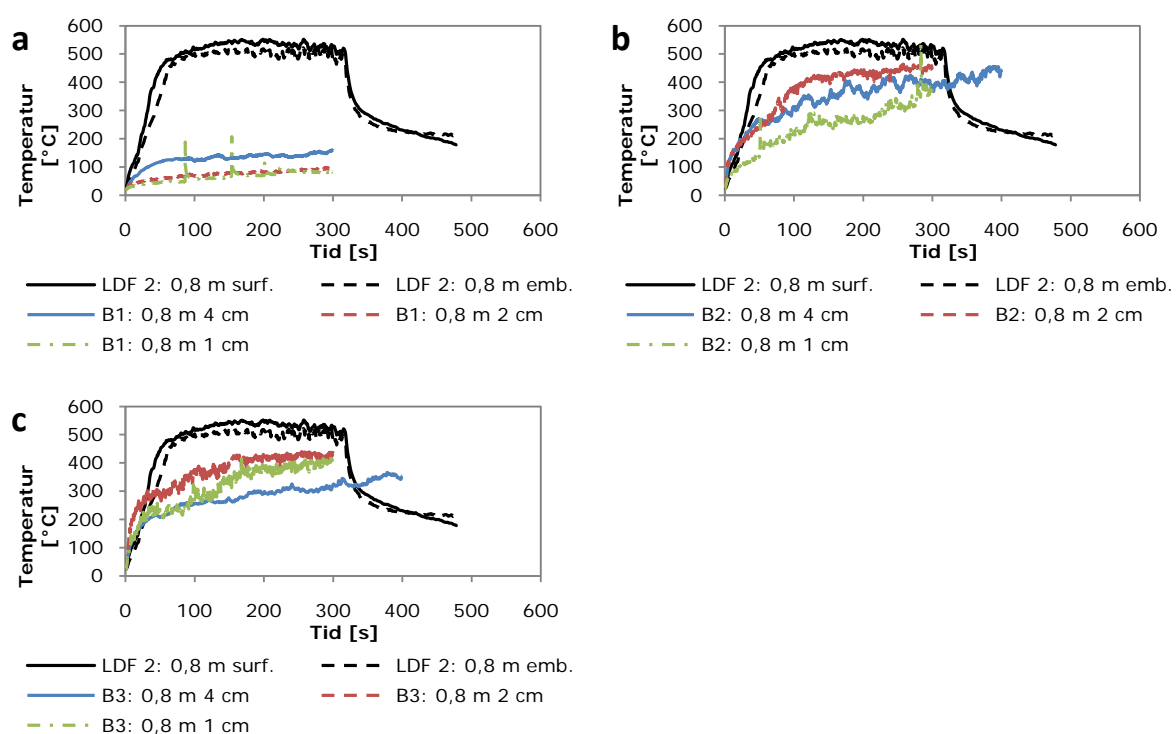
En jämförelse mellan effektutvecklingen vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för LDF-skiva redovisas i figur 7.15.



**Figur 7.15.** Jämförelse mellan experimentdata vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för LDF-skiva. (a) Effektutveckling för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (b) Effektutveckling för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (c) Effektutveckling för brännare B3 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek.



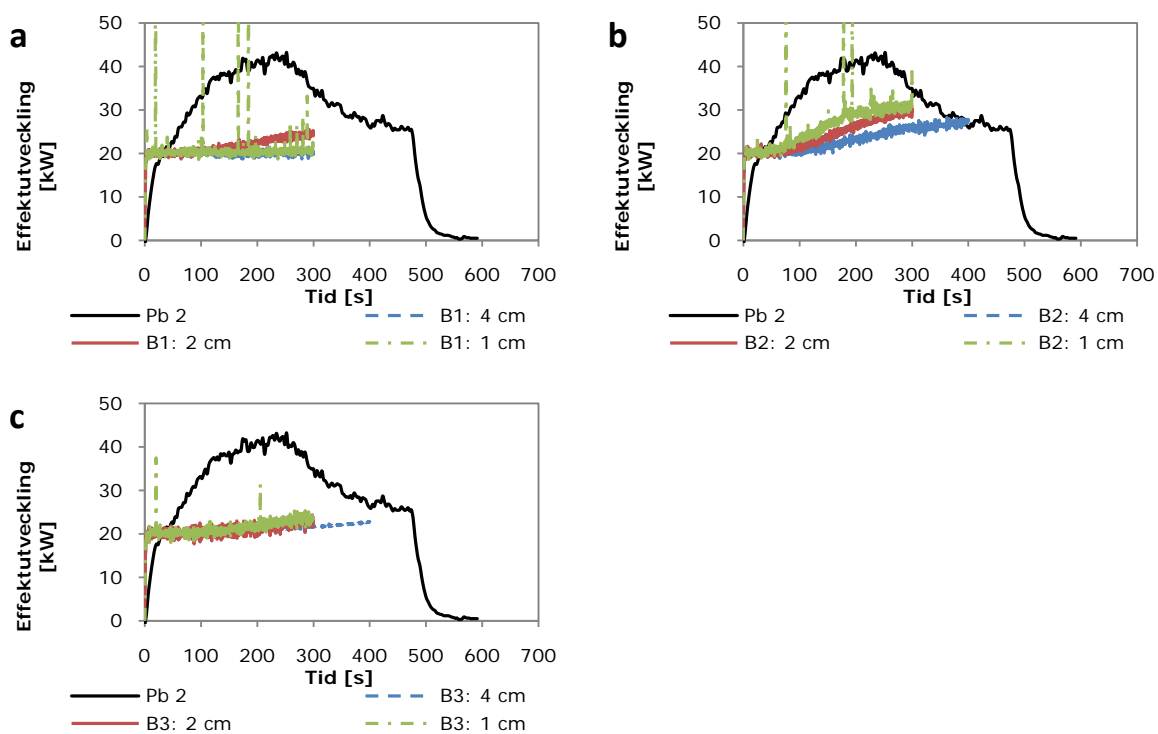
En jämförelse mellan temperaturen på 0,8 meter vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för LDF-skiva redovisas i figur 7.16. Två olika typer av temperaturgivare användes vid experimenten, benämnd surface (surf.) respektive embedded (emb.) i figuren.



**Figur 7.16.** Jämförelse mellan experimentdata vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för LDF-skiva. (a) Temperatur vid 0,8 m för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (b) Temperatur vid 0,8 m för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (c) Temperatur vid 0,8 m för brännare B3 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek.

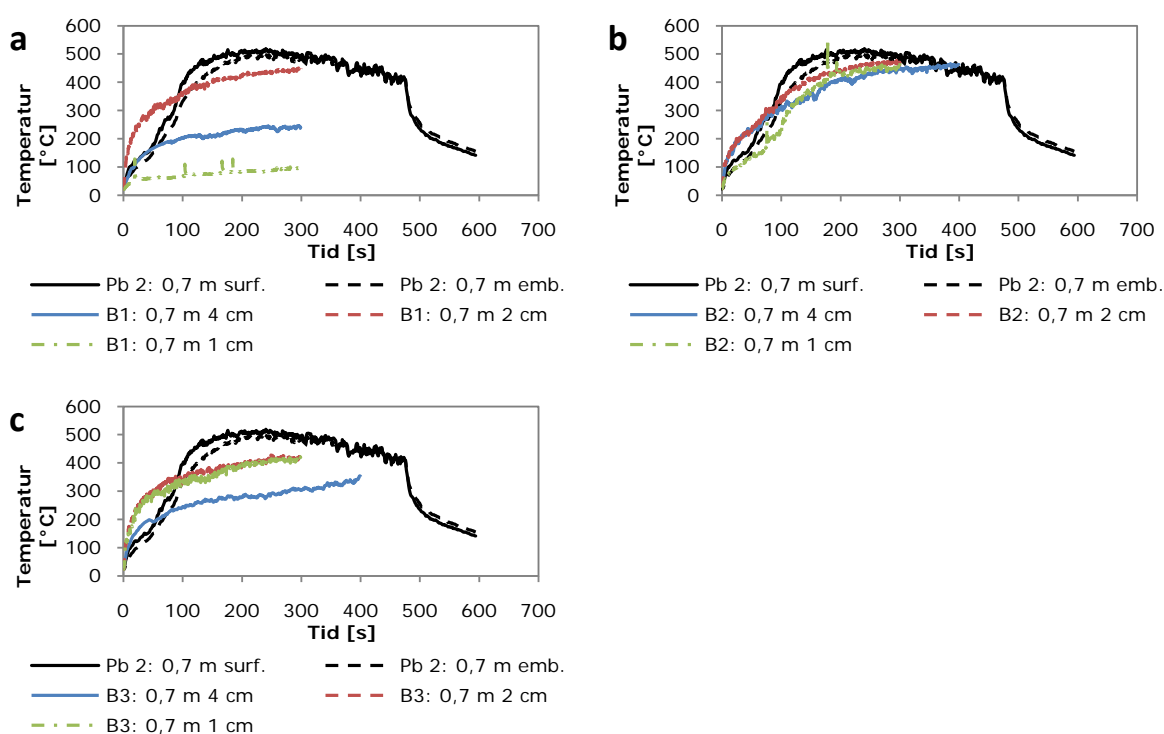
## 7.4.2 Spånskiva

En jämförelse mellan effektutvecklingen vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för spånskiva redovisas i figur 7.17.



**Figur 7.17.** Jämförelse mellan experimentdata vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för spånskiva. (a) Effektutveckling för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (b) Effektutveckling för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (c) Effektutveckling för brännare B3 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek.

En jämförelse mellan temperaturen på 0,7 meter vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för spånskiva redovisas i figur 7.18. Två olika typer av temperaturgivare användes vid experimenten, benämnd surface (surf.) respektive embedded (emb.) i figuren.



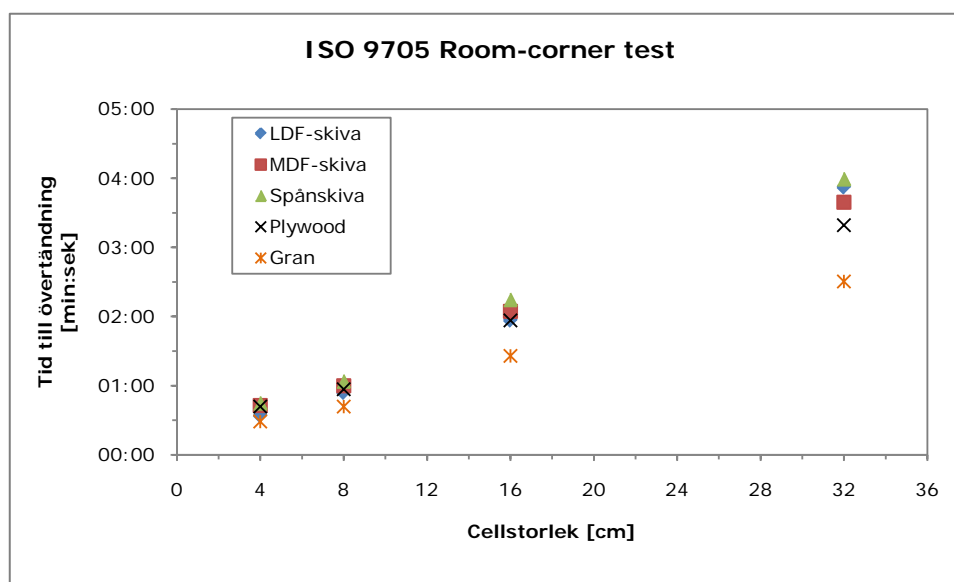
**Figur 7.18.** Jämförelse mellan experimentdata vid flamspridningsexperiment SP och simulering i FDS5 för spånskiva. (a) Temperatur vid 0,7 m för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (b) Temperatur vid 0,7 m för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek. (c) Temperatur vid 0,7 m för brännare B3 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek.

## 7.5 Simulering av ISO 9705 Room-corner test

Tiden till övertändning i simuleringarna jämfördes med tiden till övertändning i experimenten. För simuleringarna definieras övertändning till då effektutvecklingen uppnår 1 MW och för experimenten var tiden till övertändning angiven. Resultaten från simuleringarna redovisas i tabell 7.2. Som synes i tabellen visar simuleringarna att flamspridningen är beroende av storleken på cellerna och grid-oberoende uppnåddes inte. I figur 7.19 visas en jämförelse mellan de olika materialen och tiden till övertändning i simuleringarna för respektive material. För utförligare diskussion och analys om resultaten, se kapitel 8.

Tabell 7.2. Tid till övertändning för simulering och experiment för respektive material.

Material	Cellstorlek [cm]	Tid till övertändning simulering [min:sek]	Tid till övertändning experiment [min:sek]
LDF-skiva	4	00:34	00:58
	8	00:54	00:58
	16	01:57	00:58
	32	03:53	00:58
MDF-skiva	4	00:43	03:10
	8	01:00	03:10
	16	02:05	03:10
	32	03:40	03:10
Spånskiva	4	00:45	02:35
	8	01:04	02:35
	16	02:15	02:35
	32	04:00	02:35
Plywood	4	00:42	02:30
	8	00:57	02:30
	16	01:57	02:30
	32	03:20	02:30
Gran	4	00:29	02:50
	8	00:42	02:50
	16	01:26	02:50
	32	02:31	02:50



Figur 7.19. Jämförelse mellan tiden till övertändning för olika cellstorlekar och material.

## 8 Diskussion och analys

---

Följande kapitel redovisar diskussion och analys för resultaten i rapporten. Kapitlet syftar till att utvärdera resultaten från de olika simuleringarna som redovisats i resultatdelen.

### 8.1 Simulering utan flamspridningsberäkningar, Bökebergs Arena

För att göra en fullständig utvärdering av förhållandena för utrymning på Bökebergs Arena vid de valda brandscenarierna vore det nödvändigt att göra en kompletterande känslighetsanalys på de framtagna dimensionerande bränderna. I känslighetsanalysen skulle flera viktiga variabler såsom brandens tillväxthastighet, maximal effektutveckling och placering varieras för att undersöka varje variabels påverkan på resultatet. Detta faller dock utanför syftet med rapporten och därför genomfördes ingen sådan känslighetsanalys.

För de simuleringar som genomförts av de båda bränderna kan det konstateras att det endast uppstod kritiska förhållanden med avseende på brandgaslagrets höjd på balkongen vid restaurangen efter cirka 5 minuter. Någon vidare undersökning av sikt och toxicitet i brandgaserna och strålning mot personer beräknades inte heller, då även det faller utanför syftet med rapporten.

#### 8.1.1 Grid-oberoende

Då Bökebergs Arena är en väldigt stor och komplex byggnad, blev antalet celler vid simuleringen väldigt många. För 20 cm celler blev antalet celler per processor mellan 788 400 och 1,2 miljoner celler. Att minska cellstorleken ytterligare för att testa grid-oberoende blev därför omöjligt på grund av alltför långa simuleringstider och kraschade simuleringar. Däremot testades två olika mesh-indelningar och dessa visar på små skillnader i brandgaslagrets höjd och temperatur förutom vid södra manegen, där större skillnader uppstod. Branden var placerad vid den södra manegen vilket kan ha påverkat dessa skillnader.

Hur väl beräkningsdomänen återger brandplymen kan uppskattas med hjälp av det dimensionslösa talet  $D^*/\delta x$ , se avsnitt 2.1.2. Ett värde mellan 4-16 anses acceptabelt och ett ofta använt riktvärde är 10. För Bökebergs Arena blir  $D^*/\delta x$  med cellstorleken 20 cm över 4 då effektutvecklingen överstiger 640 kW. För den maximala effektutvecklingen 7,8 MW blir  $D^*/\delta x$  cirka 10 vid 20 cm i cellstorlek. Detta borde innebära att brandplymen kan återges relativt väl av den använda cellstorleken, förutom för de två första minuterna då brandens effektutveckling understiger 640 kW.

Då marginalen till kritiska förhållanden är stor för alla ställen utom på balkongen vid restaurangen anses skillnaderna mellan mesh-indelningarna vara av liten betydelse. Att grid-oberoendet inte testats helt är inte optimalt men överkomligt då två olika mesh-indelningar testats och marginalerna till kritiska förhållanden är stor.

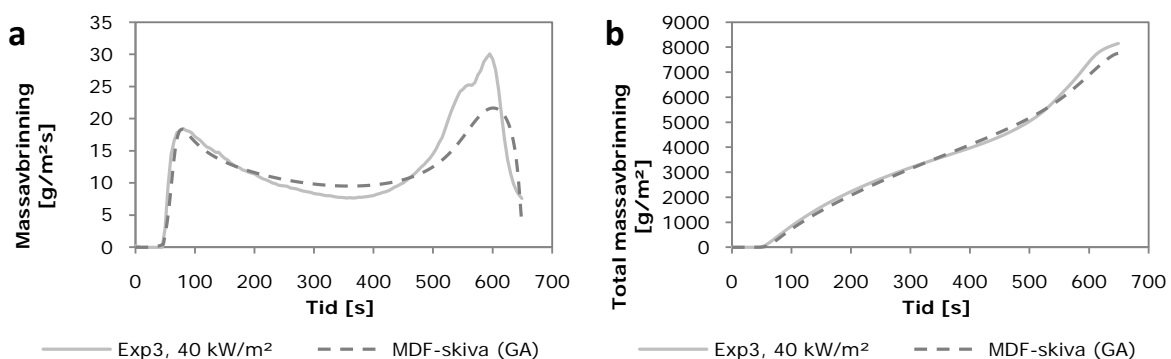
## 8.2 Gpyro och Gpyro Property Estimation Program

Från testet av parallellsimuleringen visas att Gpyro Property Estimation Program är mycket lämplig för att användas på flera processorer eller ett datorkluster. Simuleringstiden minskade avsevärt utan några synliga effekter på resultatet. Om effektiviteten i den genetiska algoritmen påverkas vid parallellsimuleringar var svårt att avgöra, då parameteroptimeringen innehåller en slumpmässig del som påverkar hur snabbt programmet finner bra lösningar. Det kan dock konstateras att färre antal processorer inte nödvändigtvis hittar en bättre lösning efter samma antal generationer. Däremot kan ett mycket större antal generationer beräknas vid användandet av flera processorer, vilket ger en större chans att programmet hittar en kombination av parametrar som ger ett resultat som stämmer väl överens med experimentet.

För alla material testades både en en-stepsreaktion och en två-stepsreaktion. För LDF-skiva, MDF-skiva och spånskiva gav en en-stepsreaktion bäst resultat och för plywood och gran var det istället en två-stepsreaktion som gav bäst resultat. För kopplingen mellan Gpyro och FDS5 märktes ingen skillnad av vilken typ av reaktion som använts. Däremot gav en en-stepsreaktion hyfsade resultat i Gpyro även för plywood och gran medan en två-stepsreaktion inte alls gav så bra resultat för LDF-skiva och spånskiva. Detta förklaras förmodligen av att för LDF-skiva och spånskiva fanns endast ett experiment med en strålningsintensitet tillgänglig. För att programmet ska kunna hitta parametrar för en två-stepsreaktion krävs förmodligen flera experiment med olika strålningsintensiteter.

Istället för att skapa ett homogent ursprungsmaterial hade ett alternativ varit att skapa ett ursprungsmaterial med en viss vattenhalt. Såsom reaktionen nu definierats blir materialens vattenhalt "inbakade" i de optimerade materialparametrarna. Om mängden vatten hade specificerats explicit, hade möjligen materialparametrarna varit mindre känsliga för materialförhållandena vid experimentet.

Figur 7.4 till figur 7.8 visar att Gpyro Property Estimation Program är kapabel till att finna en kombination parametrar som ger ett acceptabelt bra resultat från pyrolysmodellen vid jämförelse med experimenten. Två exempel på dessa figurer visas i figur 8.1.



**Figur 8.1.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.5c: Massavbrinningen vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet för MDF-skiva i Gpyro Property Estimation Program. (b) Figur 7.5d: Total massavbrinning vid 40 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet för MDF-skiva i Gpyro Property Estimation Program.

Framförallt första toppen på massavbrinningskurvan klarar programmet att skapa och den totala massavbrinningen stämmer i de flesta fall riktigt bra i början av experimenten. Däremot verkar det vara svårare att hitta parametrar som ger den andra toppen på kurvan och den totala massavbrinningen skiljer sig mer i slutet av experimentet. Detta skulle bland annat kunna bero på den oregelbundna sprickbildning som sker i samband med att ett kollager bildas, vilket drastiskt ändrar egenskaperna för materialet.

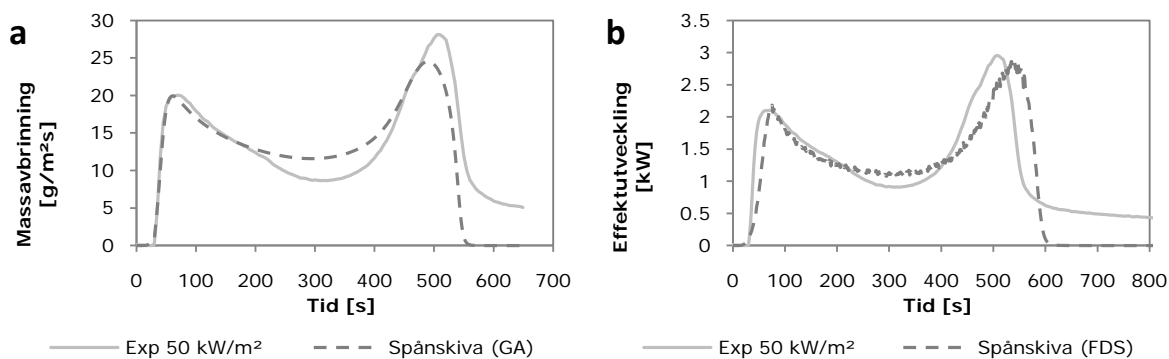
Att massavbrinningen beräknades från ett angivet, konstant förbränningsvärme,  $\Delta H_c$ , kan påverka programmets förmåga att hitta korrekta parametrar. Förbränningsvärmets värde kan variera beroende på vilken typ av kemiskt material som frigörs i pyrolysisreaktionen. Därför vore det bättre att ha tillgång till uppmätta värden på massavbrinningen, istället för att behöva beräkna den utifrån effektutvecklingen.

För plywood, där flera experiment med olika strålningsintensiteter användes, hittar programmet inte materialparametrar som ger bra resultat vid alla de olika strålningsintensiteterna. Istället hittar programmet en uppsättning parametrar som ger ett bra resultat i ett av experimenten, 35 kW/m<sup>2</sup>, men lite sämre för de andra experimenten. Detta kan antingen bero på brister i optimeringsalgoritmen eller brister i pyrolysismodellen som beskriver verkligheten. Brister i optimeringsalgoritmen kan vara till exempel att då programmet hittar en uppsättning materialparametrar, en individ, som har mycket högre jämförelsevärde med experimentet än övriga individer tenderar de övriga individerna att snabbt dö ut och programmet blir kvar vid ett lokalt maximivärde. Mutationen av individernas gener är tänkt att förhindra detta, men då endast ett fåtal gener muteras varje generation kanske det inte är tillräckligt för att ge en individ ett tillräckligt högt jämförelsevärde för att "leva vidare".

Brister i pyrolysismodellen kan vara att modellen inte tar hänsyn till alla de processer som sker i verkligheten och som påverkar massavbrinningen. I så fall går det helt enkelt inte att hitta *en* uppsättning materialparametrar som gäller för flera olika strålningsintensiteter. Detta är alltid en osäkerhet när man använder modeller som ska beskriva verkligheten och det kan därför vara en brist när man ska använda resultaten från småskala i fullskaleförsök.

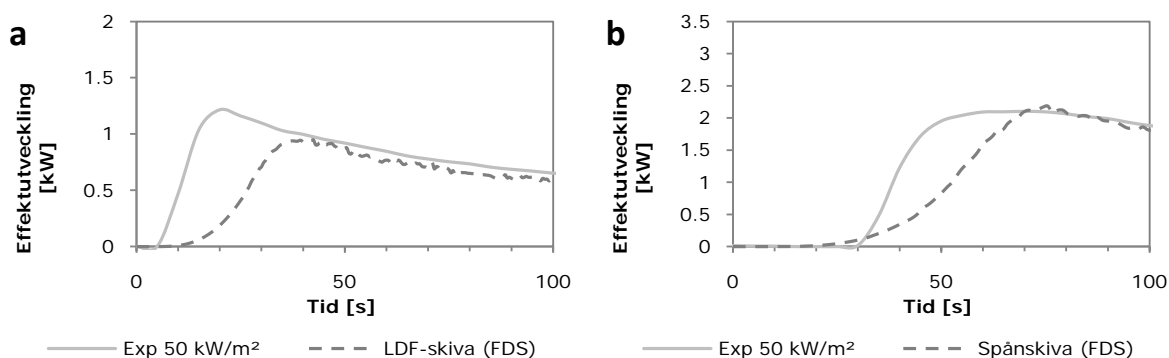
### 8.2.1 Koppling till FDS5

För att se hur bra resultaten från Gpyro och Gpyro Property Estimation Program fungerar i FDS5 gjordes ett antal simuleringar med en modell av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5. Inget fast värmeövergångstal definierades och en förbränningsreaktion användes, vilket komplicerade möjligheten att få resultat från simuleringarna som stämmer överens med experimenten. Resultaten från FDS5 skiljer sig mer från experimenten än vad resultaten från Gpyro gjorde. Ett exempel på den ökade skillnaden visas i figur 8.2.



**Figur 8.2.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.6a: Massavbrinningen vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet för spånskiva i Gpyro Property Estimation Program. (b) Figur 7.11a: Effektutvecklingen vid 50 kW/m<sup>2</sup> strålningsintensitet för spånskiva i FDS5.

Den teoretiska skillnaden mellan massavbrinningen och effektutvecklingen borde endast vara en konstant motsvarande förbränningsvärmets  $\Delta H_c$ . Men som synes i figur 8.2b sker den första toppen på effektutvecklingskurvan något senare än toppen på massavbrinningskurvan i figur 8.2a. Detta medför att den första toppen på effektutvecklingskurvan sker mycket senare än den för experimentet och detta syns extra tydligt i figur 7.9b och figur 7.11b, vilka visas på nytt i figur 8.3.



**Figur 8.3.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.9b: Uppförstoring av effektutvecklingen för de första 100 sekunderna för LDF-skiva. (b) Figur 7.11b: Uppförstoring av effektutvecklingen för de första 100 sekunderna för spånskiva.

Eftersom den första toppen på kurvan motsvarar tiden till antändning, ger detta en antändning i pyrolysmodellen som är i storleksordningen 20 sekunder efter experimentet. Trots detta kan de flesta resultaten från konkalorimetern anses vara acceptabla eftersom ingen extra tid lagts på att optimera inställningarna i FDS5 med avseende på förbränningsreaktioner, strålningsfraktion, förbränningsvärme med mera. Särskilt spånskiva gav ett resultat från FDS5 som stämmer väl överens med experimentet.



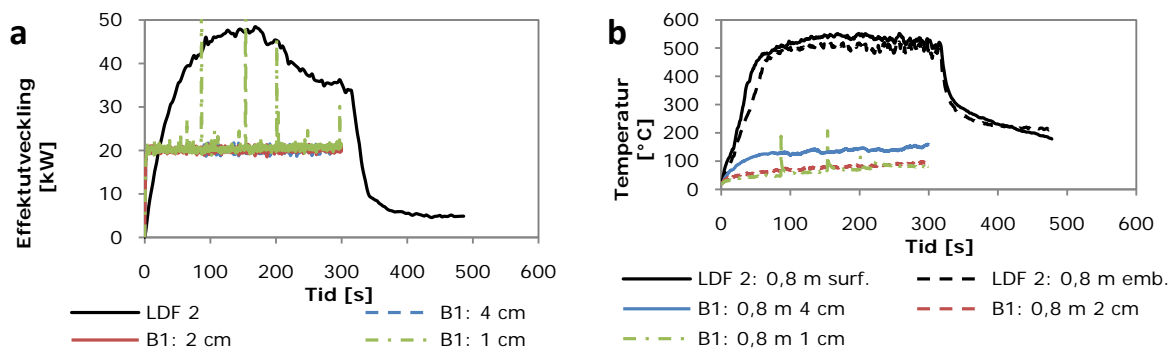
### 8.2.2 Felkällor experiment

Förutom Gpyro Property Estimation Program eventuella egna felkällor och felkällor i kopplingen mellan pyrolysmodellen i Gpyro/FDS5 och förbränningen i FDS5, är det viktigt att inse att även experiment innehåller potentiella felkällor. Till exempel användes två experiment med samma strålningsintensitet för MDF-skiva och gran vid parameteroptimeringen. Även om experimenten har exakt samma förutsättningar skiljer sig resultaten mellan experimenten något. Möjliga orsaker till felkällor i experimenten är att testmaterialen inte haft samma temperatur, fukthalt eller materialegenskaper i övrigt. Dessutom tillkommer felkällor såsom mätfel och skillnader i experimentförhållanden.

### 8.3 Simulering av flamspridningsexperiment SP

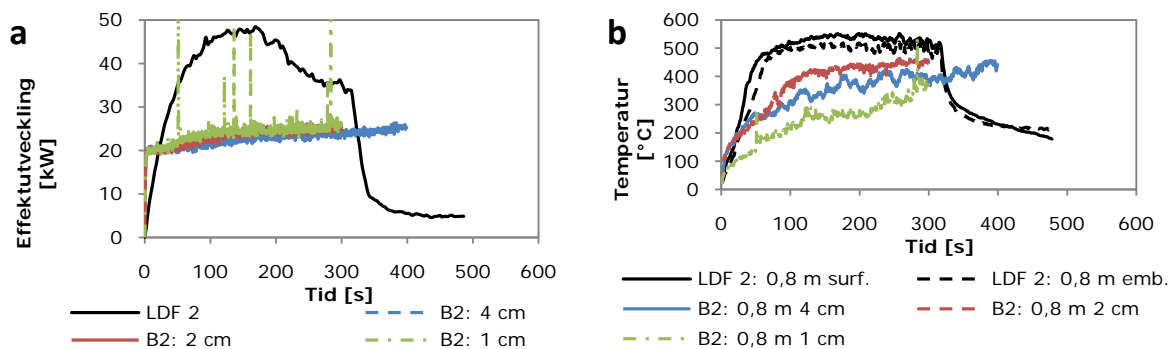
Resultaten vid simuleringarna av flamspridningsexperimentet av SP visar att flamspridningen är väldigt beroende på simuleringssuppställning. Genom att ändra typen av brännare eller strålningsfraktionen ändras resultatet väsentligt.

För brännare B1, som var en vertikal brännare med strålningsfraktion 0,3, skedde i princip ingen antändning eller flamspridning hos varken LDF-skivan eller spånskivan. Detta kan ses i figur 7.15a till figur 7.18a, där varken effektutvecklingen eller yttemperaturerna ökar nämnvärt. Två av dessa figurer visas på nytt i figur 8.4.



**Figur 8.4.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.15a: Effektutveckling för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för LDF-skiva. (b) Figur 7.16a: Temperatur vid 0,8 m för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för LDF-skiva.

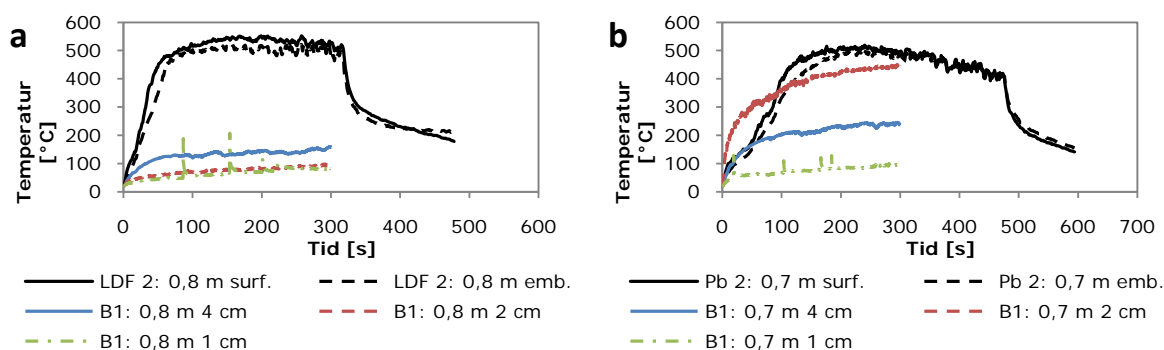
För brännare B2, där strålningsfraktionen ökades till 0,4, blev yttemperaturerna betydligt högre och effektutvecklingen stiger något. Detta kan ses i figur 7.15b till figur 7.18b. Två av dessa figurer visas på nytt i figur 8.5.



**Figur 8.5.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.15b: Effektutveckling för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för LDF-skiva. (b) Figur 7.16b: Temperatur vid 0,8 m för brännare B2 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för LDF-skiva.

För brännare B3, som var en horisontell brännare med strålningsfraktionen 0,3, blev yttemperaturerna och effektutvecklingen högre än för brännare B1. Detta tyder på att den horisontella brännaren ger en högre värmetransport till materialet än den vertikala brännaren. När strålningsfraktionen för den vertikala brännaren ökar så ökar också värme-strålningen från flammen till materialet, vilket resulterar i att materialet antänds och viss flamspridning sker.

Förutom skillnader i resultat för de olika brännartyperna, visar resultaten på betydande skillnader beroende på vilken cellstorlek som använts. För brännare B1 ändrar sig resultatet för alla de olika cellstorlekarna. Detta visas särskilt tydligt för yttemperaturen för LDF-skiva respektive spånskiva, se figur 7.16a och figur 7.18a vilka visas på nytt i figur 8.6. För spånskiva skiljer sig temperaturen mellan 100-300 °C för de olika cellstorlekarna. Dessutom ger inte samma cellstorlekar de högsta respektive lägsta temperaturer mellan LDF-skiva och spånskiva.



**Figur 8.6.** Figurer från resultatdelen. (a) Figur 7.16a: Temperatur vid 0,8 m för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för LDF-skiva. (b) Figur 7.18a: Temperatur vid 0,7 m för brännare B1 vid 4, 2 respektive 1 cm cellstorlek för spånskiva.

För brännare B2 är skillnaderna mellan de olika cellstorlekarna mindre, men likväl betydande. Cellstorlekarna 4 och 2 cm ger ungefär samma resultat medan 1 cm ger något lägre temperaturer.

Överlag var temperaturerna i simuleringarna lägre än de uppmätta temperaturerna i experimentet. Att mäta den verkliga yttemperaturen hos ett material är svårt eftersom man endast kan mäta temperaturen på termoelementet som sitter på materialet. Termoelementet behöver således inte ha samma temperatur som materialet. Om termoelementet värms upp mycket snabbare än det testade materialet ger mätningarna för höga temperaturer. Detta kan vara en bidragande orsak till att de uppmätta temperaturerna i experimenten är högre än de från simuleringarna.

På grund av skillnaderna i resultat beroende på vilken cellstorlek som använts, kan grid-oberoende inte konstateras för någon simulering. Inte heller tyder resultaten på att en cellstorlek stämmer bättre överens med experimenten överlag. För temperaturen gav vissa simuleringar och cellstorlekar ett resultat som ligger nära experimentens uppmätta värden, medan effektutvecklingen inte alls stämmer med experimenten för någon simulering. Som jämförelse kan uppskattning av hur väl beräkningsdomänen återger brandplymen beräknas med hjälp av det dimensionslösa talet  $D^*/\delta x$ , se avsnitt 2.1.2. Ett värde mellan 4-16 anses acceptabelt och ett ofta använt riktvärde är 10. För de effektutvecklingar som uppmätts i

experimenten, mellan 20 kW och upp till cirka 50 kW, blir  $D^*/\delta x$  ungefär 10 då cellstorleken är mellan 2 cm och 3 cm.

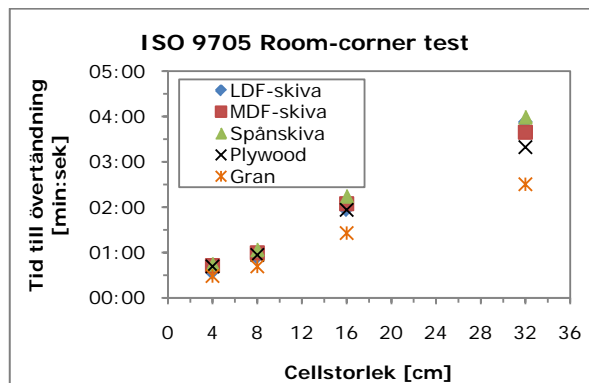
Ytterligare en faktor som kan bidra till skillnaden mellan experimenten och simuleringarna är det faktum att FDS5 endast kan hantera en typ av gasformigt bränsle. Eftersom det i experimenten sker förbränning av både propan och trämaterial måste FDS5 ta hänsyn till de olika förbränningsreaktionerna. Detta görs genom att FDS5 justerar mängden trämaterial som omvandlas till gasformigt bränsle för att ta hänsyn till skillnaderna i förbränningsvärmets  $\Delta H_c$  mellan propan och trämaterial. Detta innebär ytterligare osäkerheter i modellen, vilket är en potentiell felkälla.

Eftersom ingen brännartyp eller cellstorlek gav ett överlag bättre resultat och grid-oberoende inte uppnåts, vore det omöjligt att från enbart simuleringarna förutspå materialens beteende i verkligheten.

## 8.4 Simulering av ISO 9705 Room-corner test

Även resultaten från simuleringarna av ISO 9705 Room-Corner test visar hur beroende resultatet är av cellstorleken vid simuleringen. För samtliga material skiljer sig tiden till övertändning mellan två till tre minuter för den största cellstorleken och den minsta. Dessutom sker övertändning snabbare ju mindre celler som använts och inget grid-oberoende identifierades. Som jämförelse kan uppskattning av hur väl beräkningsdomänen återger brandplymen beräknas med hjälp av det dimensionslösa talet  $D^*/\delta x$ , se avsnitt 2.1.2. För de effektutvecklingar som studerats, från brännarens 100 kW till tiden då övertändning antogs ske vid 1 MW, blir  $D^*/\delta x$  ungefär 10 då cellstorleken är mellan 4 cm och 10 cm.

De olika materialen visar små skillnader i tiden till övertändning vid användning av samma cellstorlek, vilket kan ses i figur 7.19 och på nytt i figur 8.7.



Figur 8.7. Figur från resultatdelen. Jämförelse mellan tiden till övertändning för olika cellstorlekar och material.

Tiden till övertändning sker snabbast för gran, därefter LDF-skiva, plywood, MDF-skiva och till sist spånskiva för cellstorlekarna 4, 8 och 16 cm. För cellstorleken 32 cm inträffar övertändning för plywood före LDF-skiva annars är rangordningen mellan materialen densamma. Denna rangordning stämmer inte med hur rangordningen mellan materialen ser ut från experimenten. I experimenten sker övertändning snabbast för LDF-skiva och därefter plywood, spånskiva, gran och sist MDF-skiva.

Att skillnaderna mellan tiden till övertändning för de olika materialen är liten vid samma cellstorlek kan bero på att materialegenskaperna har liten betydelse för resultatet från FDS5 i dessa simuleringar. Övriga parametrar såsom värmeövergång från gaserna till ytan på materialet, extern strålning från brandgaser och flammor samt transport av brandgaser har förmodligen en större betydelse för flamspridningen än de olika materialegenskaperna. Skillnaden mellan resultaten från simuleringarna och experimenten beror förmodligen på att alla dessa fysikaliska processer inte modellerats korrekt i FDS5. Därför kan det inte heller konstateras om materialparametrarna som fått fram från Gpyro Property Estimation Program är korrekt eller inte.

## **8.5 Sammanfattning av diskussion och analys**

Följande avsnitt ger en kort sammanfattning av diskussionen och analysen.

### **8.5.1 Bökebergs Arena**

Utifrån de två dimensionerande bränderna som framtagits uppstår kritiska förhållanden med avseende på brandgaslagrets höjd på balkongen vid restaurangen efter cirka 5 minuter. Ingen vidare analys av brandgaslagrets sikt och toxicitet samt strålning mot personer gjordes då detta faller utanför syftet med denna rapport. Inte heller genomfördes en tillräcklig känslighetsanalys för de framtagna scenarierna.

### **8.5.2 Gpyro och Gpyro Property Estimation Program**

Gpyro och Gpyro Property Estimation Program är två program som kan användas för att hitta materialparametrar som ger ett visst resultat från den pyrolysmo­dell som används i FDS5. Gpyro Property Estimation Program visade sig vara mycket lämpligt för att använda vid parallellsimuleringar. Effektiviteten i den genetiska algoritmen verkar inte påverkas av att programmet körs parallellt. Istället kan ett större antal generationer beräknas, vilket ökar chansen att programmet hittar parametrar som ger ett önskvärt resultat.

Materialparametrar för LDF-skiva, MDF-skiva, spånskiva, plywood och gran togs fram utifrån experimentdata med hjälp av Gpyro Property Estimation Program. Resultaten visar att Gpyro Property Estimation Program är kapabel till att finna en kombination parametrar som ger ett acceptabelt bra resultat från pyrolysmo­dellen vid jämförelse med experimenten. Programmet klarar att hitta parametrar som ger en massavbrin­ning och total massavbrin­ningen som stämmer riktigt bra överens med början av experimenten.

Materialparametrarna från Gpyro och Gpyro Property Estimation Program testades även i en modell av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5, vilket gav rimligt bra resultat i jämförelse med experimenten. För kopplingen mellan Gpyro och FDS5 märktes ingen skillnad av vilken typ av nedbrytningsreaktion som använts.

För plywood, där flera experiment med olika strålningsintensiteter använts, hittar programmet inte materialparametrar som ger bra resultat vid alla de olika intensiteterna. Istället hittar programmet en uppsättning parametrar som ger ett bra resultat i ett av experimenten, 35 kW/m<sup>2</sup>, men lite sämre för de andra experimenten. Detta kan innebära en begränsning om materialparametrarna ska användas för att beskriva materialegenskaperna vid flamspridning i fullskala.

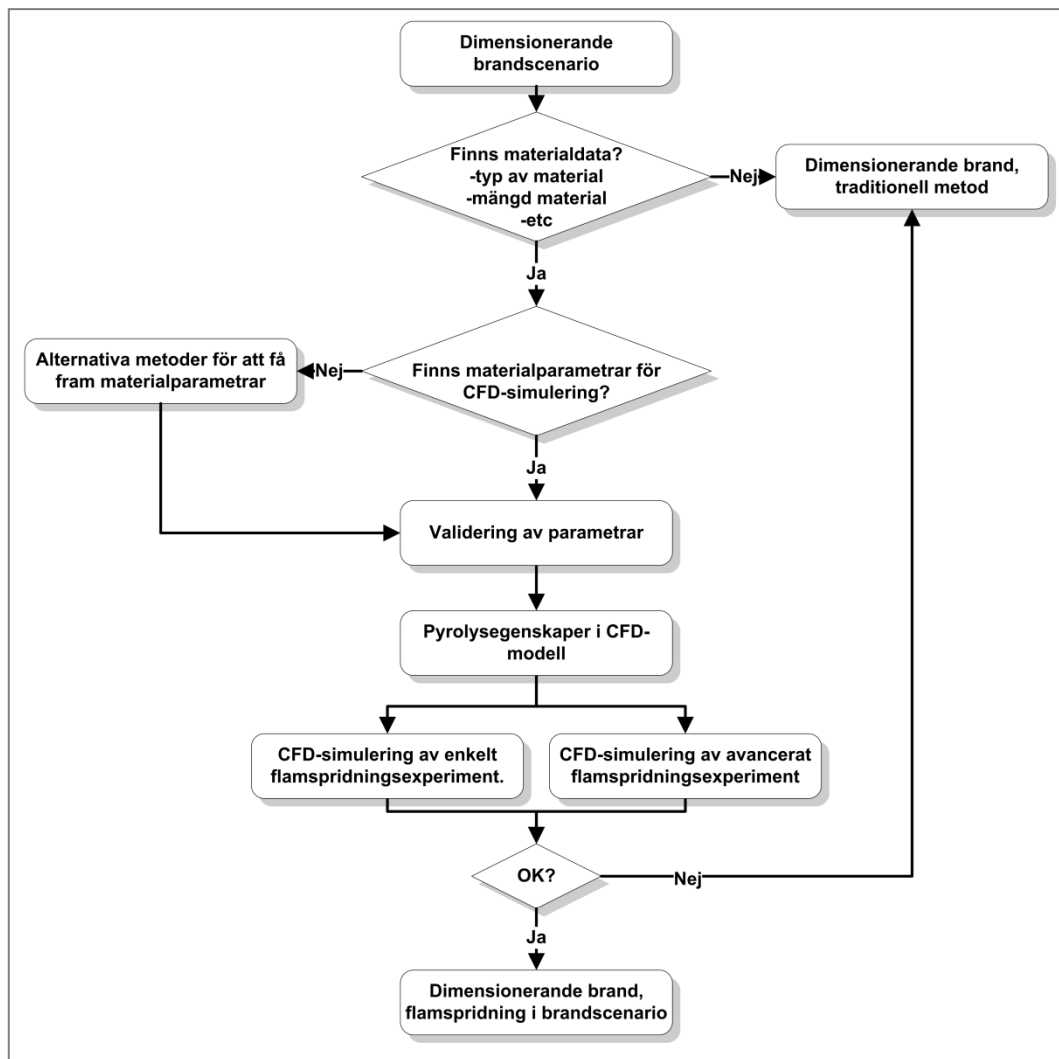
### 8.5.3 Flamspridningsberäkningar i FDS5

Materialparametrarna som framtagits av Gpyro Property Estimation Program användes för att beskriva materialegenskaperna vid två olika simuleringsuppställningar; flamspridningsexperiment av SP samt ISO 9705 Room-Corner test. Vid simuleringarna identifierades att cellstorleken hade stor betydelse för resultatet och inget egentligt grid-oberoende uppnåddes med de cellstorlekar som använts. Cellstorlekarna varierades mellan 1 cm till 4 cm för flamspridningsexperimentet av SP och mellan 4 cm till 32 cm för ISO 9705 Room-Corner test.

För ISO 9705 Room-Corner test påverkade cellstorleken resultatet mer än vad de olika materialparametrarna gjorde. Detta tyder på att värmeövergång från gaserna till ytan på materialet, extern strålning från brandgaser och flammor samt transport av brandgaser har större betydelse för flamspridningen än de olika materialegenskaperna. Alla dessa processer måste modelleras och beräknas korrekt för att flamspridningen ska kunna beräknas korrekt. Detta visas även i simuleringen av flamspridningsexperimentet av SP, där en ändring av brännaren eller strålningsfraktionen påverkade flamspridningen avsevärt. För de materialparametrar som tagits fram från Gpyro Property Estimation Program kan det därför inte konstateras hur bra de beskriver materialegenskaperna i FDS5. Materialparametrarna ger ett resultat från modellen av konkalorimetern (ISO5660) i FDS5 som är acceptabelt i jämförelse med experimenten. Däremot är det osäkert om dessa kan användas för att beskriva materialegenskaperna vid andra simuleringsuppställningar.

I de simuleringar som innehöll flamspridningsberäkningar i FDS5 konstaterades inget egentligt grid-oberoende. Dessutom påverkades resultaten från simuleringarna i hög grad av ändringar i simuleringsuppställning. För de simuleringar som gjorts vore det därför omöjligt att med hjälp av enbart FDS5 kunna förutspå hur flamspridningen skulle ske i verkligheten. Det måste således finnas tillgång till experimentdata för att kunna validera simuleringsuppställningen och därefter kan giltigheten för materialegenskaperna bedömas. Att använda FDS5 för att ta fram en dimensionerande brand vid en analytisk dimensionering anses i detta fall vara väldigt olämpligt. Därför genomfördes inte heller några flamspridningsberäkningar för Bökebergs Arena.

För de som är intresserade av att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand ställs det höga krav på utvärdering och validering av materialparametrar och simuleringsuppställning. En liknande arbetsmetod som använts i denna rapport anses vara lämplig i detta ändamål och visas i figur 8.8.



**Figur 8.8.** Förslag på arbetsmetod vid användning av flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand.

En av förutsättningarna för att kunna ta fram en dimensionerande brand med hjälp av flamspridningsberäkningar är att det finns tillräckligt med materialdata. Typen av material samt storlek och mängd måste vara kända för att det ska vara möjligt att använda flamspridningsberäkningar. Därefter kan man undersöka om det finns materialparametrar för att använda i en CFD-simulering. Om dessa saknas måste alternativa metoder för att få fram materialparametrar användas. Där kan Gpyro Property Estimation Program vara ett alternativ om relevant experimentdata finns tillgänglig.

Nästa steg är att validera sina materialparametrar. Detta görs lämpligast i tre olika steg. Först kontrolleras pyrolysegenskaperna för materialet i sin CFD-modell, där pyrolysis- och förbränningsmodellen testas genom exempelvis simulering av konkalorimetern. Om allt är i sin ordning kan materialet användas vid CFD-simulering av flamspridningsexperiment, där minst ett borde vara ett mer komplicerat flamspridningsexperiment i fullskala. Genom detta kan användaren försäkra sig om att materialet och övriga antaganden i simuleringsuppställningen ger resultat som stämmer överens med experiment i fullskala. Först därefter kan materialet användas i ett brandscenario för att ta fram en dimensionerande brand. I alla dessa steg är det viktigt att det görs en tillräcklig analys av grid-oberoende och känsligheten i simuleringsmodellen.

## 9 Slutsatser

---

Följande kapitel redovisar de slutsatser som kan konstateras utifrån resultatet samt diskussionen och analysen i denna rapport.

### 9.1 Bökebergs Arena

För simuleringarna av de två dimensionerande bränderna som framtagits utan att använda flamspridningsberäkningar kan följande konstateras:

- Kritiska förhållanden med avseende på brandgaslagrets höjd uppstår på balkongen vid restaurangen efter cirka fem minuter.
- Ingen ytterligare analys av brandgaslagrets sikt och toxicitet, strålning mot personer eller en tillräcklig känslighetsanalys av scenarierna gjordes, då detta faller utanför syftet med denna rapport.

### 9.2 Gpyro och Gpyro Property Estimation Program

För Gpyro och Gpyro Property Estimation Program kan följande konstateras:

- Gpyro Property Estimation Program kan användas för att finna materialparametrar som ger ett visst bestämt resultat från pyrolysmodellen i FDS5.
- Framförallt den första toppen på massavbrinningskurvan klarar programmet att återskapa, däremot verkar det svårare att finna parametrar som stämmer med den andra toppen på massavbrinningskurvan.
- Programmet är väldigt lämpligt att köra parallellt på flera processorer.
- För kopplingen mellan Gpyro och FDS5 märktes ingen skillnad beroende på om en enstegs eller tvåstegs-nedbrytningsreaktion använts.

### 9.3 Flamspridningsberäkningar i FDS5

För simuleringarna med flamspridningsberäkningar kan följande konstateras:

- Flamspridningen i FDS5 är väldigt beroende på vilken cellstorlek som använts.
- Inget egentligt grid-oberoende uppnåddes med de cellstorlekar som använts.
- För simuleringarna vid ISO 9705 Room-Corner test hade cellstorleken större betydelse för resultatet än vad de olika materialparametrarna hade.
- Flamspridningen i FDS5 är väldigt beroende på vilken simuleringsuppställning som använts.
- För att flamspridning ska kunna beräknas korrekt måste övriga delprocesser i ett brandscenario beräknas korrekt. Transporten av brandgaser samt värmeöverföringen mellan gaser och material genom strålning, ledning och konvektion måste således beräknas korrekt innan flamspridningsberäkningar används.
- För de simuleringar som gjorts vore det omöjligt att med hjälp av enbart FDS5 kunna förutspå hur flamspridningen skulle ske i verkligheten.
- Att använda flamspridningsberäkningar för att ta fram en dimensionerande brand kräver höga krav på utvärdering och validering av materialparametrar och simuleringsuppställning. Förslag på en lämplig arbetsmetod redovisas under avsnitt 8.5.3 och i figur 8.8.





## 10 Förslag till framtida arbeten

---

Flamspridningsberäkningar är ett område som kräver kunskap om ett stort antal mer eller mindre komplicerade processer. Förutom grundläggande kunskap om materialegenskaper och de processer som sker då ett material utsätts för värme, krävs kunskaper om CFD-beräkningar och pyrolysmodeller. Därför behandlar denna rapport endast en väldigt liten del inom detta område. I detta kapitel redovisas därför några förslag på framtida arbeten utifrån de problem som uppstått i arbetet med denna rapport.

- Mer arbete för att validera de materialparametrar som framtagits med hjälp av Gpyro Property Estimation Program vore önskvärt. Detta kräver en simuleringsuppställning som beskriver ett flamspridningsexperiment på ett så korrekt sätt som möjligt.
- Denna rapport undersökte endast två typer av nedbrytningsreaktioner för material som utsätts för värme. I Gpyro finns möjlighet till mer avancerade pyrolysmodeller som dessutom direkt kan kopplas till FDS5 genom att använda Gpyro som ett gränsvillkor i FDS5. Detta är möjligt genom att det i Gpyros programpaket finns en särskild version av FDS5 som innehåller pyrolysmodellen från Gpyro. Det vore intressant att undersöka hur bra dessa modeller fungerar och om pyrolyreaktionerna och flamspridningsberäkningarna kan förbättras genom att använda mer avancerade pyrolysmodeller.
- I denna rapport användes befintliga experiment från konkalorimeter (ISO5660) för att söka materialparametrar. Därför användes effektutvecklingen för att beräkna massavbrinningen vid experimenten. Materialtemperatur eller tjocklek vid experimenten mättes inte vid experimenten. Dessutom fanns för varje material endast ett fåtal försök vid olika strålningsintensiteter tillgängligt. För att ytterligare förbättra möjligheten till att finna materialparametrar som korrekt kan beskriva materialegenskaperna vid fullskala skulle flertalet nya experiment behöva göras. För samma material skulle därmed olika strålningsintensiteter kunna testas och temperatur, effektutveckling samt massavbrinning kunna mätas. Därtill skulle samma material därefter kunna användas vid lämpliga experiment i fullskala. Detta innebär att hela proceduren med identifiering av materialparametrar och validering av dessa i fullskala skulle kunna göras med större noggrannhet.
- En brist av väldefinierade, enkla flamspridningsexperiment i fullskala för att validera flamspridning i FDS5 identifierades i arbetet med denna rapport. ISO 9705 Room-Corner test är inte optimalt att använda i detta hänseende på grund av att flamspridningen påverkas för mycket av yttre faktorer som strålning från brandgaslager etcetera. Dessutom innebär den stora rumsstorleken att simuleringarna tar onödigt lång tid att genomföra. Flamspridningsexperimentet av SP är bättre i detta avseende, där inget brandgaslager påverkar flamspridningen nämnvärt och storleken på rummet är mindre. Däremot är brännaren som använts i experimentet svår att modellera i FDS5 och en vanlig propanbrännare hade varit mer lämpligt att använda i experimentet.



# 11 Källförteckning

---

- [1] **Karlsson, Björn & Quintiere, James G.** *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2000.
- [2] **Brandskyddshandboken.** *Rapport 3134*. Brandteknik. Lund : Lunds Tekniska Högskola, 2005.
- [3] **Hjolman, Maria, Försth, Michael & Axelsson, Jesper.** *Design fire for a train compartement*. (Brandforsk project 401-051, SP report 2009:08). Borås : SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2009.
- [4] **McGrattan, Kevin B., Klein, Bryan, Hostikka, Simo & Floyd, Jason E.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. (NIST Special Publication 1019-5 July 30 2008). Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2008. ss. 57-59, 69-72.
- [5] **Kwon, Jae-Wook.** *Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread*. M.Sc. Thesis. Worcester : Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [6] **Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo och Vaari, Jukka.** *FDS simulation of fire spread - comparison of model results with experimental data*. VTT Working papers 4. Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2004.
- [7] **Ho, Kwok Yan.** *Flame spread Modelling Using FDS4 CFD Model*. M.Sc. Thesis. Canterbury : Departement of Civil Engineering, University of Canterbury, 2007.
- [8] **Hjohlman, Maria & Andersson, Petra.** *Flame spread modelling of textile materials*. (SP report 2008:34). Borås : SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2008.
- [9] **Lautenberger, Chris, Rein, Guillermo & Fernandez-Pello, Carlos.** The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire data. *Fire Safety Journal*. 2006, Vol. 41, 3, ss. 204-214.
- [10] **Matala, Anna.** *Estimation of solid phase reaction parameters for fire simulation*. M.Sc. Thesis. Helsinki : Helsinki University of Technology, 2008.
- [11] **McGrattan, Kevin B., Hostikka, Simo, Floyd, Jason, Klein, Bryan & Prasad, Kuldeep.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide: Volume 3: Validation*. (NIST Special Publication 1018-5 February 6 2009). Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [12] **Janssen, Mark.** *Fundamental Thermophysical Characteristics of Wood and their Role in Enclosure Fire Growth*. Ph.D. Thesis. Gent, Belgium : University of Gent, 1991.
- [13] **Spearpoint, Michael J. & Quintiere, James G.** Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model - effect of species, grain orientation and heat flux. *Fire Safety Journal*. 2001, Vol. 36, 4, ss. 391-415.

- [14] **Lautenberger, Chris.** *Gpyro - Generalized pyrolysis model for combustible solids (Elektronisk)*. Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkley. Tillgänglig: <<http://code.google.com/p/gpyro/>> (2009-08-25).
- [15] **ISO 5660-1:2002.** *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*. Switzerland, Geneva: : International Organization for Standardization, 2002.
- [16] **Blomqvist, Per & van Hees, Patrick.** *Upward flame spread experiments - a preparatory study. SP AR 2001:32*. Borås : SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, 2001.
- [17] **ISO 9705:1993.** *Fire tests - Full-scale room test for surface products*. Switzerland, Geneva : International Organization for Standardization, 1993.
- [18] **Yeoh, Guan Heng & Yuen, Kwok Kit.** *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering - Theory, Modeling and Practice*. Oxford, UK : Elsevier Inc., 2009. ss. 4, 34, 37, 84.
- [19] **McGrattan, Kevin B., Hostikka, Simo, Floyd, Jason E., Baum, Howard R., Rehm, Ronald G., Mell, William & McDermott, Randall.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide: Volume 1: Mathematical Model*. (NIST Special Publication 1018-5 July 30 2008). Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2009. ss. 5, 8-9, 20, 23-29.
- [20] **McGrattan, Kevin B., Baum, Howard R. och Rehm, Ronald G.** Large Eddy Simulations of Smoke Movement. *Fire Safety Journal*. 1998, Vol. 30, 2, ss. 161-178.
- [21] **Quintiere, James G.** *Principles of Fire Behavior*. Albany, N.Y. : Delmar Publishers, 1998.
- [22] **Drysdale, Dougal.** *An Introduction to Fire Dynamics - 2nd ed.* Chichester, West Sussex, UK : John Wiley & Sons Ltd., 1998. ss. 51, 233, 237-254.
- [23] **Janssens, Marc.** *Flame Spread Properties from Cone Calorimetry - General*. I Babrauskas, Vytenis & Grayson, S. J. (red.) Heat Release in Fires. London : Elsevier Applied Science, 1992. Kapitel 9.
- [24] **Lautenberger, Chris, Torero, Jose & Fernandez-Pello, Carlos.** *Understanding materials flammability*. I Apte, Vivek B. (red.) Flammability testing of materials used in construction, transport and mining. Cambridge : Woodhead, 2006. Kapitel 1.
- [25] **Quintiere, James G.** *Surface Flame Spread*. I DiNenno, Philip J. (red.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Quincy, Massachusetts : Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, 2002. Kapitel 2-12.
- [26] **Babrauskas, Vytenis.** *Effect of Environmental Variables*. I Babrauskas, Vytenis & Grayson, S. J. (red.) Heat Release in Fires. London : Elsevier Applied Science., 1992. Kapitel 10.
- [27] **Lautenberger, Chris.** *Gpyro - A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids User's Guide. Version 0.700*. Berkeley, CA : Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2009.

- [28] **Lautenberger, Chris.** *Gpyro - A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids Technical Reference. Version 0.700.* Berkeley, CA : Departement of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2009.
- [29] **Bökebergs Gård AB.** *Bökebergs Arena (Elektronisk).* Tillgänglig: <<http://www.bokeberg.com/sub/arena.htm>> (2009-06-24).
- [30] **Brandskyddsdokumentation.** *Kv. Yddinge 3:1, Svedala Ridhus. Brandskyddsdokumentation. Relationshandling med åtgärdsförslag - förhandskopia.* Handläggare Mats Andersson. Malmö : ØSA Brand & Risk, Tyréns AB, 2009-05-19.
- [31] **Hansson, Kristian.** *Utvärdering av metoder för val av dimensionerande brandscenario.* Rapport 5220. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola., 2007.
- [32] **Stockholmsmässan.** *Tekniska bestämmelser – Stockholmsmässan. (Elektronisk).* Pdf-format. Tillgänglig: <[http://www.stockholmsmassan.se/edrum/uploaded/document/2009/6/17/TEK\\_BES\\_sv0906.pdf](http://www.stockholmsmassan.se/edrum/uploaded/document/2009/6/17/TEK_BES_sv0906.pdf)> (2009-06-24).
- [33] **Elmia-mässan.** *Brandföreskrifter – Utställarservice (Elektronisk).* Tillgänglig: <<http://www.elmia.se/sv/utstallarservice/Information/Teknisk-guide/Hallar/Brandforeskrifter/>> (2009-06-24).
- [34] **Svenska mässan.** *Brandföreskrifter för utställare. Svenska mässan monter-service. (Elektronisk).* Tillgänglig: <<http://www.monter-service.com>> / Tekniska bestämmelser / Brandföreskrifter (2009-06-24).
- [35] **Östman, Birgit & Tsantaridis, Lazaros.** *Europeisk brandklassning av träprodukter. Trätekniska Kontenta .* Stockholm : Träteknik, Institutet för träteknisk forskning, 2003.
- [36] **Abrahamsson, Marcus.** *Scenariotänkande vid brandsyn i samlingslokaler.* Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 1997. ss. 10, 18.
- [37] **Borgström, Fredrik, Fridolf, Karl, Johansson, Ulf & Sundbom, Mats.** *Brandteknisk riskvärdering av Idrottens Hus.* Rapport 9338. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2008.
- [38] **Särdqvist, Stefan.** *Initial Fires – RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests.* Rapport 3070. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 1993.
- [39] **Thunderhead Engineering.** *Pyrosim 2008 (Elektronisk).* Tillgänglig: <<http://www.pyrosim.com/>> (2009-11-05).
- [40] **SP Swedish National Testing and Research Institute.** *SP Fire Database (elektronisk).* Tillgänglig: <<http://www.sp.se/fire/fdb>> (2009-09-22).
- [41] **Boverket.** *Regelsamling för byggande, BBR 2008.* Karlskrona : Boverket, 2008. ss. 109-110.
- [42] **Hostikka, Simo.** *Development of fire simulation models for radiative heat transfer and probabilistic risk assessment.* (VTT Publications 683). Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. ss. 54-57.

[43] **ASTM E1321-97a**. *Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties*. West Conchohocken, PA : ASTM fire standards, ASTM International, 2004.

# Bilaga A Fire Dynamics Simulator

---

Följande bilaga syftar till att ge en översiktlig beskrivning av de modeller som CFD-programmet Fire Dynamics Simulator 5, FDS5, använder. För utförligare beskrivning av den bakomliggande teorin rekommenderas *FDS (version 5) Technical Reference Guide* [19].

## A.1 Hydrodynamisk modell

Som nämnts i kapitel 2.1.2 löser FDS en variant av Navier-Stokes ekvationer för flöden med låg hastighet styrda av termiska gradienter [19]. I FDS5 finns två tekniker för att modellera turbulens: Large Eddy Simulation, LES, och Direct Numerical Simulation, DNS. Grundtanken bakom tekniken LES är att de turbulenta virvelrörelserna som mest bidrar till omblandning och rörelse av en fluid är tillräckligt stora för att de ska kunna beräknas enligt ekvationer från fluidmekaniken [18]. Effekten av de mindre virvelrörelserna kan förhoppningsvis approximeras med någon lämplig modell [18].

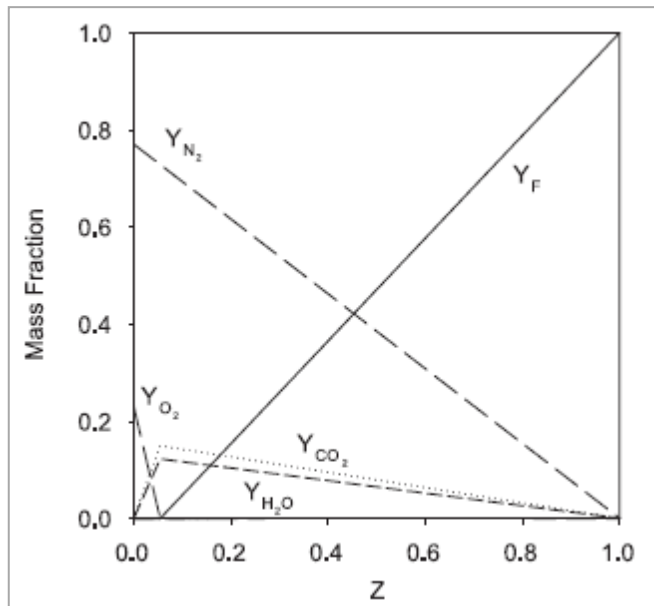
I den LES-modell som FDS5 använder modelleras turbulens med en längdskala som är mindre än storleken på cellerna som används i simuleringen, medan turbulens med en längdskala som är större än storleken på cellerna beräknas explicit från kontinuitets-ekvationerna. Detta innebär att molekylära egenskaper som den dynamiska viskositeten,  $\mu$ , den termiska konduktiviteten,  $k$  och materialdiffusiviteten,  $\alpha$  inte kan användas direkt i turbulensekvationerna utan effekten av dessa måste istället modelleras. FDS5 använder en modell framtagen av Smagorinsky för att modellera effekten av  $\mu$ ,  $k$  och  $\alpha$ . [19]

Om storleken på cellerna blir tillräckligt liten, i storleksordningen 1 mm eller mindre, kan de molekylära egenskaperna  $\mu$ ,  $k$  och  $\alpha$  användas direkt i lösningen som då anses vara en Direct Numerical Simulation. [19]

## A.2 Förbränningsmodell

Två huvudsakliga typer av förbränningsmodeller finns inbyggda i FDS5. Den första, som är vald som standard, kallas för "Mixture Fraction Combustion Model". Idén bakom modellen är att programmet beräknar massfraktionen av bränsle i förhållande till massfraktionen syre i varje cell och tidssteg. Blandningsfraktionen (mixture fraction),  $Z$ , är således en funktion av både tid och rum:  $Z(\mathbf{x},t)$  där  $\mathbf{x}=(x,y,z)$ . Per definition är  $Z = 1$  vid ytan av en brännare och  $Z = 0$  i ren luft.

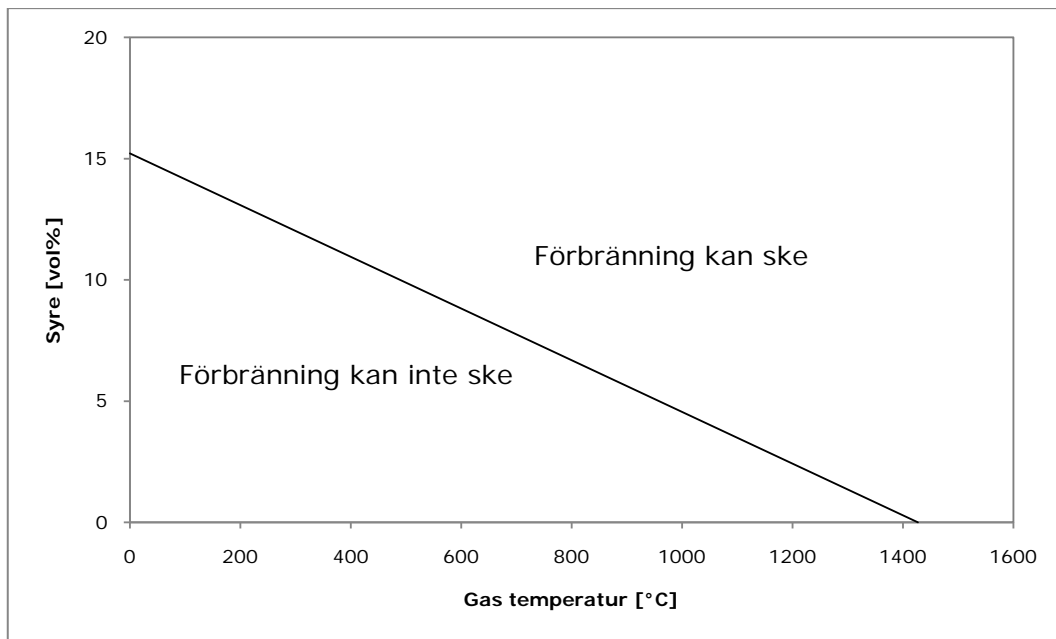
Om det kan antas att reaktionen mellan syre och bränsle, när de blandas, sker snabbt och fullständigt anses förbränningen vara blandningskontrollerad. Detta innebär att man genom blandningsfraktionen,  $Z(\mathbf{x},t)$  och ett empiriskt framtaget samband kan bestämma massfraktionen av produkterna i förbränningsprocessen. Exempel på ett sådant samband för metan visas i figur A-1. Att massfraktionerna av produkter i gasblandningen kan bestämmas endast med hjälp av blandningsfraktionen, vilket innebär att syre och bränsle reagerar direkt när de blandas, är ett antagande som brukar kallas för "mixed-is-burned". Detta antagande stämmer bra för bränsle-kontrollerade bränder. [19]



**Figur A-1.** Visar förhållandet för metan mellan blandningsfraktionen (mixture fraction),  $Z$ , och massfraktionen för förbränningsprodukterna  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  respektive bränsle (fuel). Detta innebär att om  $Z = 1$  är massfraktionen bränsle,  $Y_F$ , lika med ett och det övriga massfraktionerna lika med noll. Om  $Z \approx 0,45$  är massfraktionen bränsle och kvävgas lika stora, ungefär lika med 0,42 medan massfraktionen koldioxid och vatten är i storleksordningen 0,07-0,08. Från McGrattan et. al [19].

I FDS5 finns en möjlighet att frångå antagandet att "mixed-is-burned" och istället låta bränsle och syre blandas utan att förbrännas, om särskilda villkor inte är uppfyllda. Detta medför att två blandningsfraktioner beräknas,  $Z_1$  och  $Z_2$ , där  $Z_1$  står för blandningsfraktionen av bränsle-syre när ingen förbränning sker och  $Z_2$  står för blandningsfraktionen av bränsle-syre när förbränning sker. Denna modell är vald som standard i FDS5 och villkoren som gäller när förbränning kan ske respektive inte kan ske visas i figur A.2. Om villkoren faller inom "icke-förbränningszonen" sker ingen reaktion utan  $Z_1$  förblir konstant men om villkoren faller inom "förbränningszonen" konverteras  $Z_1$  till  $Z_2$ . Observera att  $Z_1$  representerar ett förhållande mellan massfraktionerna för bränsle och syre, vilket innebär att  $Z_1$  är ett uttryck för massa hos respektive ämne. Detta medför att  $Z_1$  kan transporteras, enligt kontinuitetsekvationen för massa, från ett område i rummet där förbränning inte kan ske till ett område där förbränning kan ske. För  $Z_2$  gäller samma förutsättningar som för "mixed-is-burned", dvs. att  $Z_2$  bestämmer helt och hållet massfraktionerna för förbränningsprodukterna enligt liknande samband som visas i figur A-1. [19]





**Figur A-2.** Visar standardvillkoren för FDS5 för när förbränning kan respektive inte kan ske. Som synes beror villkoren för när förbränning kan ske både på temperatur och syrekonzentrationen. Baserad på McGrattan et. al [19].

Villkoren som ges i figur A-2 kan justeras i FDS5 genom att ange värden för lägsta syrgashalt där förbränning kan ske (Limiting Oxygen Limit) och kritisk flamtemperatur. Dessa anges med kommandona `X_O2_LL` respektive `CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE` på kommandoraden `REAC`. Som standard är dessa vald till `X_O2_LL = 0,15` (vid 20°C) och `CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE = 1 427°C`. Ändras dessa värden så justeras lutningen på kurvan i figur A-2. [19]

I FDS5 använder Mixture Fraction Combustion Model en enstegs förbränningsreaktion som standard. Detta innebär att för varje molekyl av bränsle som reagerar med syre bildas en viss bestämd andel av  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$  och sot, vilka inte deltar i någon ytterligare kemisk reaktion. Andelen av  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$  och sot som bildas när en viss typ av bränsle förbränns specificeras med hjälp av antalet molekyler av ämnena H, C och N i bränslet tillsammans med "yields" för  $CO$  och sot. Dessa "yields" baseras på experimentella mätningar utanför flammorna av det aktuella bränslet, vilket ger en bra uppskattning av andelen  $CO$  och sot som bildas när bränslet får brinna under välventilerade förhållanden. Vid underventilerade bränder bildas däremot en mycket högre andel av  $CO$  och sot i flammorna, som har ett överskott av bränsle i förhållande till syre. För att ta hänsyn till att  $CO$  och sot bildas i högre grad vid ett underskott av syre finns i FDS5 en möjlighet att beräkna en två-stegs förbränningsreaktion. Denna innebär att bränsle som reagerar med syre först producerar förbränningsprodukterna  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $N_2$  och sot men inget  $CO_2$ . Om tillräckligt med syre finns tillgängligt efter det, reagerar  $CO$  med syre i ytterligare en förbränningsreaktion och bildar  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$  och sot i den andel som är specificerade i respektive ämnes "yields". Om tillräckligt syre inte finns tillgängligt sker ingen ytterligare reaktion, utan en högre andel av  $CO$  och sot har bildats. Två-stegs reaktionen väljs i FDS5 genom att välja `CO_PRODUCTION = TRUE`. i kommandoraden `MISC`. [19]

Den andra förbränningsmodellen som finns tillgänglig i FDS5 är "Finite-Rate Reaction". Denna innebär att diffusionen av de kemiska ämnena (bränsle, syre och förbränningsprodukter) kan modelleras direkt med hjälp av koncentrationerna för respektive ämne och temperaturen i flammorna. Detta kräver att koncentrationerna och temperaturen i flammorna är beräknade med mycket hög noggrannhet, vilket endast är möjligt för en DNS simulering och därför är modellen endast tillgänglig när DNS används. [19]

### A.3 Strålningsmodell

I FDS5 används en "Finite Volume radiation model" för att beräkna värmetransport genom strålning. Modellen är härledd från den enklaste varianten av Radiative Transfer Equation (RTE), vilket innebär att ingen brytning av strålningen antas ske i gasfas i cellerna utan antingen passerar strålningen rakt igenom en cell eller så kan den absorberas. RTE löses senare genom en numerisk metod kallad "Finite Volume Method". Denna beräknar strålningen genom att dela upp strålningen i varje cell i 100 olika sfäriska vinklar, vilket resulterar i en RTE för varje vinkel. Dessa RTE integreras samt beräknas och summan av alla vinklar blir strålningsintensiteten från den cellen. [19]

Då strålningsintensiteten är beroende på våglängd, delas strålningspektrumet in i ett mindre antal våglängdsband för vilka RTE löses separat. Den totala strålningsintensiteten fås genom att summera intensiteten för varje band. Som standard i FDS5 antas en "grågas modell" där endast ett band, den för ett grått medium, används. Detta antagande bygger på att i de flesta större bränder är det sotet i brandgaserna som är den strålningskälla som har störst betydelse för strålningen. Sot har ett kontinuerligt strålningspektrum och kan därför antas stråla som ett grått medium. [42]

För bränder som producerar relativt lite sot, i förhållande till koldioxid och vatten, ger antagandet om en "grå gas" att strålningen från branden överskattas. Därför finns i FDS5 även en möjlighet att använda en "wide-band model", där antalet våglängdsband som används ökar till sex stycken. Det finns även en möjlighet att öka antalet band till nio stycken, om man vet att absorptionen av strålningen från branden har stor betydelse. [42]

Eftersom strålningsintensiteten är starkt beroende på temperaturen, intensiteten är beroende på temperaturen upphöjt i fyra, är det viktigt att temperaturen i cellerna är korrekt för att strålningsberäkningen ska bli korrekt. För celler där gränsen till flammen befinner sig beräknas en medeltemperatur för hela cellen och temperaturen blir mycket lägre än vad den skulle vara i flammen, speciellt vid användning av en grövre cellstorlek. I övriga celler, där inga flammor befinner sig, är riktigheten i den beräknade temperaturen mycket större. Därför beräknar FDS5 strålningsintensiteten olika för celler där flammor befinner sig och för celler där inga flammor befinner sig. I celler där flammor befinner sig, eller snarare celler där en effektutveckling sker, beräknas strålningsintensiteten både enligt temperaturen i cellen och enligt en förutbestämd strålningsfraktion, radiative fraction, av den totala effektutvecklingen per volymenhet som finns i cellen. FDS5 använder sedan den maximala strålningsintensiteten av de båda beräknade som strålningskälla. För celler där ingen effektutveckling sker, utanför flammorna, beräknas strålningsintensiteten endast med hjälp av temperaturen. [42]

## A.4 Modeller för fasta material

I FDS5 beräknas värmeledning för fasta material i 1-D [19]. Detta innebär att om ytan på en vägg utsätts för en värmepåverkan via konvektion och/eller strålning leds värme i djupled, rakt in i väggen, utan att värmeledning sker i höjd- respektive längdled. Ingen värmeledning sker alltså till omkringliggande celler. Fasta material, såsom väggar och tak, kan specificeras i FDS5 med hjälp av flera lager, där vart och ett av dessa lager kan bestå av flertalet materialkomponenter [4]. För att beräkna värmeledning i sådana flerlayersobjekt viktas konduktivitet samt densitet samman utifrån de enskilda komponenternas massandelar och konduktivitet respektive densitet [19].

Ett viktigt steg för att kunna beräkna värmeledning inom fasta material är att kunna beräkna strålnings- och konvektiv värmeöverföring från de omgivande gaserna till ytan på materialet. I en DNS simulering, där gränsskiktet mellan ytan och den omgivande gasen är väl återgiven, beräknas den *konvektiva* värmeöverföringen direkt ur temperaturgradienten mellan ytan och den omgivande gasen [19]. I en LES simulering måste istället ett konvektivt värmeövergångstal,  $h$ , beräknas. I FDS5 beräknas  $h$  som [19]:

$$h = \max\left(C|T_{gas} - T_w|^{\frac{1}{3}}, \frac{k_{air}}{L} 0,037 Re_L^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}\right) [W/m^2K] \quad (A.1)$$

där  $C$  är en empirisk framtagen konstant (1,31 för vertikala ytor och 1,52 för horisontella),  $T_{gas}$  och  $T_w$  är temperaturen i gasen respektive hos väggytan,  $k_{air}$  är värmekonduktiviteten för luft,  $L$  är en karaktäristisk längd = 1,  $Re$  är det lokala Reynolds tal och  $Pr$  är Prandtl's tal = 0,7. I ekvation (A.1) motsvarar det första uttrycket inom parenteserna värmeövergångstalet för naturlig konvektion och det andra uttrycket för påtvingad konvektion. Det andra uttrycket motsvarar exakt uttrycket för påtvingad konvektion med turbulent flöde i Drysdale [22]. Båda uttrycken är således framtagna empiriskt. [19]

Värmeöverföringen genom strålning till materialet från de omgivande gaserna beräknas genom att sätta upp en balans mellan ingående och utgående strålning inom materialet [19]. Strålningen kan således tränga in i materialet och absorberas, vilket bestäms genom att ange en absorptionskoefficient för materialet [4]. Detta är nytt för FDS5, i tidigare versioner skedde all absorption av strålning vid ytan av materialet [4]. Då berodde den utgående strålningen endast av temperaturen vid ytan, men numera beror den istället på materialets innertemperatur [4].

Notera att ovanstående resonemang om värmeledning inom fasta material även gäller för hur FDS5 beräknar värmeledning för vätskor. Vätskor behandlas som om de vore termiskt tjocka fasta objekt, utan hänsyn till att konvektion kan ske inom vätskan. [19]

### Pyrolysis

Varje enskild materialkomponent i FDS5 kan genomgå termisk nedbrytning och ge upphov till fasta restmaterial, vattenånga och/eller bränsleångor. Detta definieras av användaren genom att ange massandelar, "yielder", som produceras av varje restprodukt när ursprungsmaterialet bryts ned. Exempelvis ett material med massandel 0,5 för fasta restmaterial och 0,5 för bränsleångor bryts ned fullständigt genom att bilda 50 massprocent av vardera fast restmaterial och bränsleångor. Dessa material kan sedan genomgå ytterligare reaktioner, vilket också specificeras av användaren. [19]

Användaren måste även specificera vid vilken temperatur som ett material börjar brytas ned och med vilken hastighet som materialet bryts ned vid den temperaturen. Pyrolyshastigheten,  $r_{ab}$ , vid temperatur  $T_s$  av materialkomponent  $a$  som genomgår nedbrytningsprocess  $b$  ges då av [19]:

$$r_{ab} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{s,a}}{\rho_{s,0}} \right) = \left( \frac{\rho_{s,a}}{\rho_{s,0}} \right)^{n_{s,ab}} A_{ab} \exp \left( -\frac{E_{ab}}{RT_s} \right) \max[0, T_s - T_{thr,ab}]^{n_{t,ab}} \quad (\text{A.2})$$

där  $\rho_{s,a}$  är densiteten för materialkomponent  $a$ ,  $\rho_{s,0}$  är ursprungsdensiteten för materialet,  $n_{s,ab}$  är reaktionsordningen,  $A_{ab}$  är pre-exponentiella faktorn,  $E_{ab}$  är aktiveringsenergin,  $R$  är allmänna gaskonstanten,  $T_{thr,ab}$  är en tröskeltemperatur där ingen nedbrytning sker och  $n_{t,ab}$  är en exponent för att justera om tröskeltemperaturen skall påverka nedbrytningen eller inte. Som standard i FDS5 är  $T_{thr,ab}$  lika med  $-273,15^\circ\text{C}$  och  $n_{t,ab}$  lika med noll vilket innebär att den sista termen i ekvation (A.2) inte påverkar pyrolyshastigheten. [4]

# Bilaga B Simuleringsuppställning Bökebergs Arena

---

I följande bilaga redovisas ritningar med måttangivelser som använts för att bygga upp modellen av Bökebergs Arena i FDS5 samt ett exempel på en inputfil till simuleringen. Då inputfilerna innehåller oerhört många rader för att definiera rumsgeometrin samt beskriva branden, uteslöts dessa i bilagan.

## B.1 Exempel på inputfil i FDS5

```
-----  
9 MESHES, 0.20m cells, "Brand på scen", with heat transportation through walls and  
ceiling.  
(Except stand and beams, which are adiabatic.)  
-----
```

```
&HEAD CHID='bokeberg9MESH' TITLE='Bökebergs Arena, brand på scen' /  
&TIME T_END=900.00/  
&DUMP RENDER_FILE='bokeberg9MESH.gel', DT_RESTART=50.00/  
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3700/
```

```
----- 9 MESHES, 1 200 000 cells for each mesh, 0.20m cells. -----  
&MESH ID='MESH1', IJK=48,250,100, XB=-1.00,8.60,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=0 /  
&MESH ID='MESH2', IJK=48,250,100, XB=8.60,18.20,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=1 /  
&MESH ID='MESH3', IJK=48,250,100, XB=18.20,27.80,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=2 /  
&MESH ID='MESH4', IJK=48,250,100, XB=27.80,37.40,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=3/  
&MESH ID='MESH5', IJK=48,250,100, XB=37.40,47.00,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=4/  
&MESH ID='MESH6', IJK=48,250,100, XB=47.00,56.60,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=5/  
&MESH ID='MESH7', IJK=48,250,100, XB=56.60,66.20,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=6/  
&MESH ID='MESH8', IJK=48,250,100, XB=66.20,75.80,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=7/  
&MESH ID='MESH9', IJK=48,250,100, XB=75.80,85.40,-0.20,49.80,-0.20,19.80  
MPI_PROCESS=8/
```

```
----- Wood, red oak. -----  
&REAC ID='Wood(red oak)',  
FYI='From SFPE Handbook 3rd ed. Table 3.4-14 and Table 3-4.16.  
Radiative fraction = 0.37.',  
C=1.00,  
H=1.70,  
O=0.72,  
N=1.0000000E-003,  
HEAT_OF_COMBUSTION=1.2400000E004,  
CO_YIELD=4.0000000E-003,  
SOOT_YIELD=0.0150/
```

```
&MATL ID='Wood',  
FYI='Wood, fir. From SFPE Handbook 3rd ed. Appendix B.',  
SPECIFIC_HEAT=2.72,  
CONDUCTIVITY=0.1100,  
DENSITY=420.00/
```

```
&MATL ID='Lconcrete',  
FYI='Lightweight concrete. From Karlsson & Quintiere, p. 122.',  
SPECIFIC_HEAT=1.00,
```

## Bilaga B - Simuleringsuppställning Bökebergs Arena

---

```
CONDUCTIVITY=0.1500,
DENSITY=500.00/
&SURF ID='Ceiling',
FYI='Ceiling, 0.21m of woodpanels, ignoring the corrugated iron. Backing to
void.',
COLOR='CORAL',
MATL_ID(1,1)='Wood',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.2100/

&SURF ID='Exterior walls and floors',
FYI='Exterior walls, 0.3m with heat transport and void backing.',
COLOR='GRAY 80',
MATL_ID(1,1)='Lconcrete',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.3000/

&SURF ID='ADIABATIC',
COLOR='GRAY 80',
ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='Balcony floors',
FYI='For restaurant balcony and north balcony',
COLOR='LIGHT GOLDENROD',
BACKING='EXPOSED',
MATL_ID(1,1)='Wood',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.3000/
&SURF ID='Burner',
FYI='HRR for stage fire. Fast growth rate to 7.8MW, then decay 180s to 1.8MW
and then constant 1.8MW to 900s.',
COLOR='RED',
HRRPUA=1.9500000E003,
RAMP_Q='Burner_RAMP_Q'/
```

---- Burner\_RAMP\_Q har uteslutits i bilagan. ----

```
----- Output devices. -----
&DEVC ID='LAYER BALCONY->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=42.11,42.11,35.31,35.31,9.20,19.20/
&DEVC ID='LAYER BALCONY->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=42.11,42.11,35.31,35.31,9.20,19.20/
&DEVC ID='LAYER BALCONY->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=42.11,42.11,35.31,35.31,9.20,19.20/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND NORTH->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=24.81,24.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND NORTH->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=24.81,24.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND NORTH->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=24.81,24.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND SOUTH->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=59.81,59.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND SOUTH->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=59.81,59.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER FLOOR BEHIND STAND SOUTH->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=59.81,59.81,41.21,41.21,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER NORTH->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=24.81,24.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
&DEVC ID='LAYER NORTH->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=24.81,24.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
&DEVC ID='LAYER NORTH->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=24.81,24.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
&DEVC ID='LAYER SOUTH->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=59.81,59.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
&DEVC ID='LAYER SOUTH->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=59.81,59.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
&DEVC ID='LAYER SOUTH->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=59.81,59.81,27.91,27.91,0.00,15.80/
```

## Bilaga B - Simuleringsuppställning Bökebergs Arena

```
&DEVC ID='LAYER UNDER BALCONY->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=42.31,42.31,45.51,45.51,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER UNDER BALCONY->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=42.31,42.31,45.51,45.51,6.00,9.00/
&DEVC ID='LAYER UNDER BALCONY->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=42.31,42.31,45.51,45.51,6.00,9.00/

-- Byggnadsgeometri, brandgasluckor etc. har uteslutits i bilagan --

&OBST XB=62.40,64.40,19.20,21.20,0.00,0.50,
SURF_IDS='Burner','INERT','INERT'/ Burner

----- Output boundary- and slicefiles -----
&BNDF QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX'/

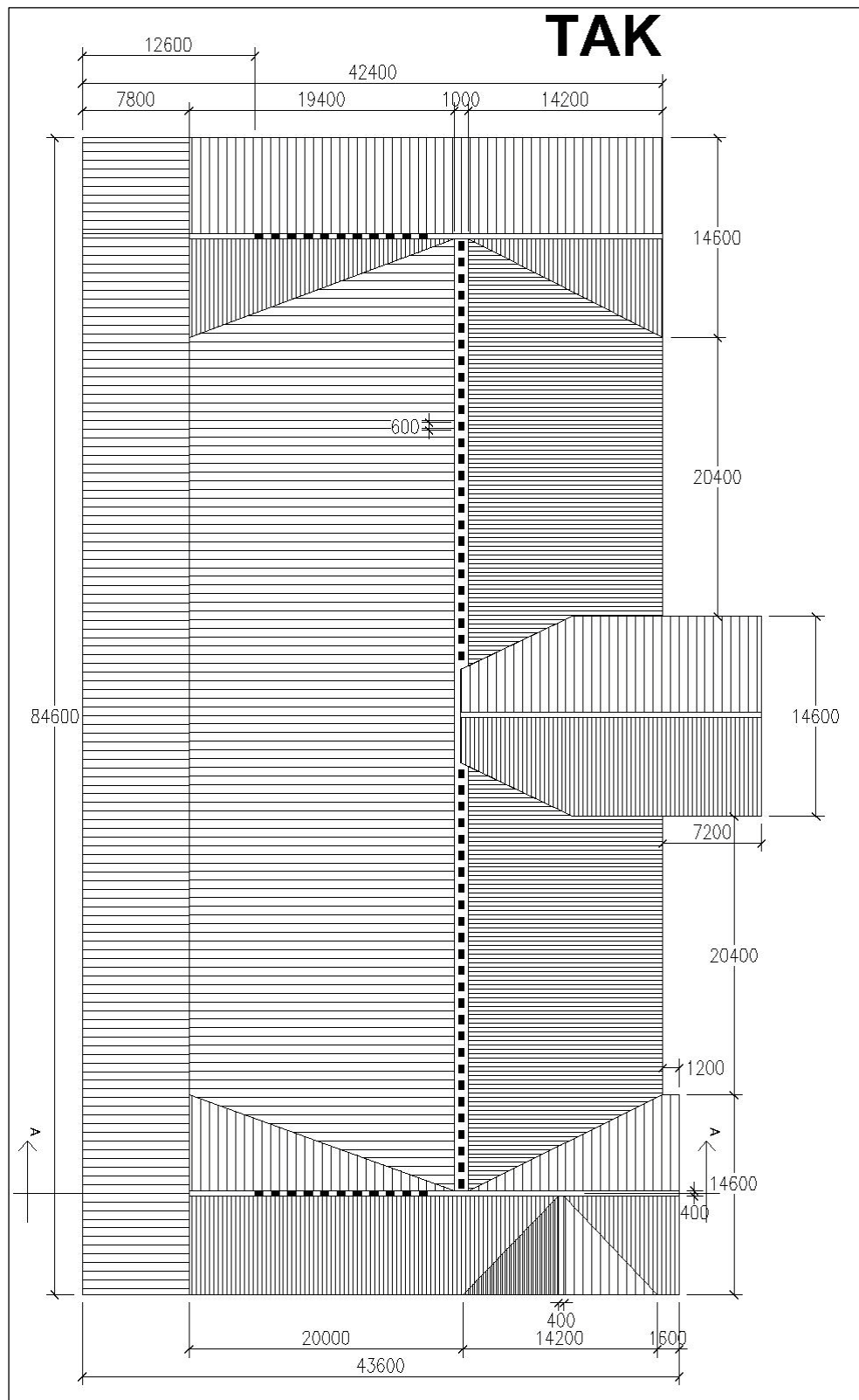
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=27.91/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=27.91/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=77.31/
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=77.31/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=42.31/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=42.31/
&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBX=42.31/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=27.91/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=27.91/
&SLCF QUANTITY='oxygen', PBX=27.91/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=41.21/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=41.21/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=41.21/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=7.31/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=77.31/

&TAIL/

-----
Slut på inputfilen
-----
```

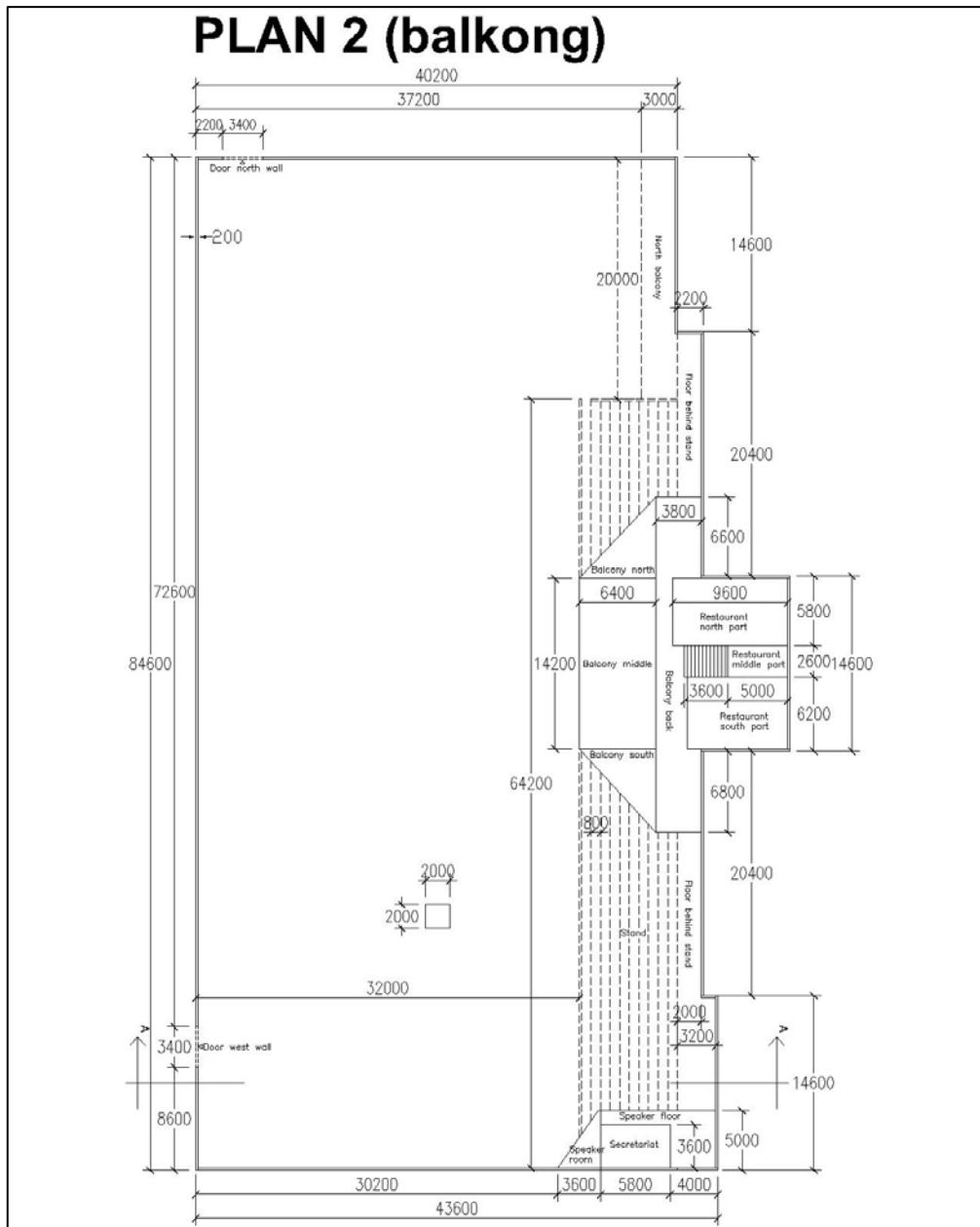
## B.2 Måttangivelser

Figur B-1, B-2 och B-3 visar de mått som använts i modellen av Bökebergs Arena.

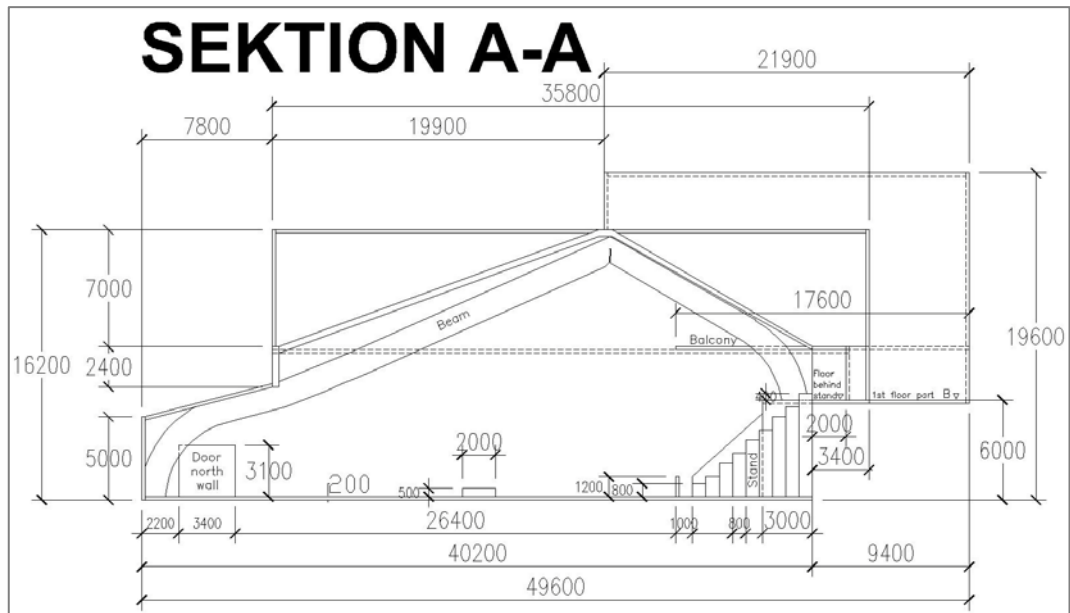


**Figur B-1.** Visar utvändiga mått som använts i modellen av Bökebergs Arena vid simuleringarna i FDS5.





**Figur B-2.** Visar mått för modellen av Bökebergs Arena som använts vid simuleringarna i FDS5. Figuren visar ett tvärsnitt genom plan två, som innehåller restaurang med balkong samt sekretariat.



**Figur B-3.** Visar mått för modellen av Bökebergs Arena som använts vid simuleringarna i FDS5. Figuren visar ett tvärsnitt benämnt sektion A-A vars placering visas i figur B-1 och B-2.

# Bilaga C Inställningar Gpyro och Gpyro Property Estimation Program

---

Förutom inmatning av försöksdata från experiment måste en del inställningar göras för Gpyro Property Estimation Program. All justering av programmets inställningar samt infogandet av försöksdata görs enklast genom att använda någon av de Excel-exempelfiler som följer med programmet. Samma Excel-filer används även för att justera inställningarna för Gpyro. Dessa Excel-filer innehåller totalt 14 stycken flikar för justering av olika egenskaper såsom generella inställningar, val av outputs, egenskaper för fasta material, försöksuppställning etcetera. Förutom dessa 14 flikar får man skapa extra flikar för att ange experimentdata när Gpyro Property Estimation Program ska användas. När alla inställningar är färdiga i Excel-filen körs ett makroprogram som skapar en färdig indatafil till Gpyro eller Gpyro Property Estimation Program. Makrot körs genom att trycka Ctrl + g.

Experimentdata måste kopieras in i Excel-filen enligt vissa mönster. I fliken *qe* anges förutsättningarna för varje experiment. Där anges bland annat strålningsintensitet, uppskattat värmeövergångstal, tid till antändning, uppskattad strålning från flammen efter antändning och total tid för experimentet. Varje experiment får då ett index IQE som måste motsvara namnet på de extra flikar man skapat. De extra flikarna måste döpas enligt 01, 02, 03 för experiment med index 1, 2 och 3 osv. Om man exempelvis har två experiment under fliken *qe* skapar man således flik 01 och 02 där man infogar experimentdata för experiment ett respektive två. Om flera olika typer av mätningar gjorts för ett och samma experiment, infogas dessa olika mätningar i samma flik i förutbestämda kolumner, se exempel i tabell C.1.

**Tabell C.1.** Exempel på hur experimentdata skall anges i experimentflikarna. För exemplet anges under fliken GA\_phi att mätdata med index 1 är för temperatur, index 2 är massavbrinning (MLR) och index 3 är tjocklek (DLT). Temperatur måste anges i Celsius, massavbrinning i g/m<sup>2</sup>s och tjocklek i meter. Som synes anges tiden först och motsvarande mätdata i kolumnen till höger om tiden. Vid flera olika typer av mätdata för ett och samma experiment separeras de olika mätvärdena med en tom kolumn (kolumn C och F i exemplet).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	t	TEMP		t	MLR		t	DLT
2	0	20		0	0		0	0,012
3	1	20		0,5	0		10	0,012
4	2	21		1,0	0,1		60	0,0118
5	OSV.	OSV.		OSV.	OSV.		OSV.	OSV.

Typen av experimentdata som infogats i respektive kolumn anges under fliken *GA\_phi*. Under denna flik anges om de angivna värdena är mätningar av temperatur, massavbrinning eller materialets tjocklek. Detta medför att Gpyro Property Estimation Program vet från vilka kolumner i vilken flik som den ska hämta mätdata ifrån samt vilken typ av mätvärde det är. Om massavbrinning för experimentet finns tillgänglig kan Gpyro Property Estimation Program beräkna den totala massavbrinningen och använda detta som ett optimeringsvillkor.

Förutom att ange experimentdata och experimentförutsättningar, måste man ange vilka reaktioner materialet ska genomgå och vilka restprodukter som ska bildas. Fasta material definieras under fliken *sprops* (solid properties) och vilka reaktioner som de fasta materialen ska genomgå anges under fliken *rxns* (reactions). För till exempel plywood kan man under *sprops* ange tre olika typer av fasta ämnen: plywood, kol och restprodukter. Därefter anger man under *rxns* två stycken reaktioner: nedbrytning av plywood till kol samt från kol till restprodukter. Detta skapar en två-stegs nedbrytningsreaktion från ursprunglig plywood till restprodukter genom ett mellansteg med bildandet av kol. Om man istället vill ha en enstegs nedbrytningsreaktion anger man under *sprops* endast två typer av fasta material, för till exempel spånskiva anges två ämnen: spånskiva samt restmaterial under *sprops* och under *rxns* anges istället bara en reaktion: från spånskiva till restmaterial.

En viktig inställning under fliken *general* är parametern *FDSMODE* som kan antingen vara *.TRUE.* eller *.FALSE.*. Om *FDSMODE* = *.TRUE.* körs Gpyro i FDS-läge, vilket innebär att Gpyro använder samma pyrolysmoell som FDS5 använder. Detta innebär att vissa parametrar som angivits i Excel-filen skrivs över med de standardvärden som används i FDS5. De parametrarna samt vilka värden som används på dessa när Gpyro körs i *FDSMODE*, redovisas i tabell C.2.

**Tabell C.2.** Sammanställning av de parametrar och deras värden när Gpyro körs i FDSMODE. Parametrarna är indelade efter under vilken flik i Excel-filen som de finns.

General		LAYERS	
Parameter	Värde	Parameter	Värde
TWOD	.FALSE.	HCRZ	0
PROPERTY_LINTERP	.TRUE.	HCRX	0
THERMAL_EQUILIBRIUM	.FALSE.	NXCELLS_PER_LAYER	1
SOLVE_GAS_ENERGY	.FALSE.	SOLVE_POROSITY_IN_LAYER	.FALSE.
SHYI_CORRECTION	.TRUE.	GPROPS	
SOLVE_PRESSURE	.FALSE.	Parameter	Värde
SOLVE_POROSITY	.FALSE.	NGSPECS	1
SOLVE_GAS_YJ	.FALSE.	YJ0	1,0
ECXPLICIT_T	.TRUE.	M	29
USE_TOFH_NEWTON	.TRUE.	SIGMA	5,061
FRONT_GAS_DIFFUSION	.FALSE.	EPSOK	254
GAS_DIFFUSION	.FALSE.	B	0,0
BLOWING	.FALSE.	RXNS	
NSSPECIESITERNS	1	Parameter	Värde
NCONTINUITYITERNS	1	DHS	DHV
ALPHA	1,0	CHI	1,0
NCOEFF_UPDATE_SKIP	1	ORDERO2	0,0
USE_BC_PATCHES	.FALSE.	IKINETICMODEL	0
CONVENTIONAL_RXN_ORDER	.TRUE.	IO2TYPE	0
NOCONSUMPTION	.FALSE.	M	0,0
VHLC	0,0	SPROPS	
GYIELDS		Parameter	Värde
Parameter	Värde	KAPPA	9,9
GYIELDS	1,0	TMELT	5000
HGRXNS		DHMELT	0,0
Parameter	Värde	SIGMA2MELT	1,0
NHGRXNS	0	GAMMA	0,0

Under fliken *GA\_GenInput* anges inställningar för den genetiska algoritmen. Några av dessa inställningar är antal individer i populationen, antal generation som ska beräknas, maximalt antal kopior av en individ och hur stor andel (hur många gener) av en avkomma som är en linjär kombination av föräldrarnas gener. Till sist så bestäms under fliken *GA\_Vars* vilka materialparametrar som optimeringsalgoritmen ska söka en lösning på. För varje parameter anges en referens till vilken flik som parametern finns, sannolikheten för att parametern ska muteras vid reproduktion, hur mycket en mutation ska kunna frångå det ursprungliga värdet vid reproduktion, inom vilka min- och maxvärden som optimeringsalgoritmen kan justera parametern samt om några parametrar är korrelerade mellan varandra [27]. Dessutom finns för varje parameter en kolumn *Log*, där .TRUE. innebär att min- och maxvärdena står för 10-logaritmen och .FALSE. innebär att min- och maxvärdena inte är logaritmerade.

För att makrot som automatiskt skapar en indatafil till Gpyro och Gpyro Property Estimation Program utifrån Excel-filen ska fungera korrekt är det viktigt att under alla flikar ange rätt värde på antal material och parametrar som varje flik har. Detta värde anges i första cellen A1 för respektive flik. För exempelvis fliken *sprops* anges i cell A1 antal fasta ämnen, *NSPEC*, som ska finnas med. Om man definierat tre material, exempelvis plywood, kol och rest-material måste *NSPEC* anges till tre för att alla material ska tas med vid skapandet av indata-filen. Ett lägre värde medför att sista materialet utesluts och ett högre värde medför att tomma rader kopieras in i indata-filen. På liknande sätt måste antal reaktioner, antal gas-ämnen, antal gasfas-reaktioner etcetera motsvara det antal som angetts på respektive flik.

För att Gpyro Property Estimation Program ska kunna köras måste indata-filen vara döpt till *gpyro.data*. I Excel-filen anges namnet på indata-filen under fliken *output*. Där anges parametern *casename* till *gpyro* så skapar makrot en indatafil med rätt namn.

När alla inställningar är gjorda, en indata-fil skapats och Gpyro Property Estimation Program körts färdigt skapar programmet automatiskt ett antal utdatafiler. En av dessa, *gpyro\_results\_best.csv*, innehåller den lösning som bäst följer experimentens testresultat. Denna komma-avgränsade Excel-fil kan importeras till Excel eller annat kalkylprogram. På första raden finns värdena för respektive parameter som programmet skulle optimera. Dessutom finns en jämförelse mellan programmets lösning och respektive experiments testresultat. Testresultaten ligger i kolumnerna med rubriken 01\_act, 02\_act för experiment ett respektive två och programmets lösning ligger i kolumnerna med rubriken 01\_try, 02\_try osv. Om den ursprungliga Excel-filen där inställningarna till input-filen öppnas från samma mapp som *gpyro\_results\_best.csv* ligger i, kan de funna värdena på respektive parameter automatiskt kopieras tillbaka till den ursprungliga filen. Detta görs genom att köra ett makro genom att trycka Ctrl + p.

Om man vill att Gpyro automatiskt ska skapa en FDS-indatafil måste man köra Gpyro en gång med de värden som Gpyro Property Estimation Program hittat. Då skapas en väldigt enkel modell av konkalorimetern i FDS5 och från FDS-indatafilen kan färdiga MATL-rader för materialet hämtas.

# Bilaga D Konkallorimeter (ISO5660) FDS5

---

Följande bilaga redovisar exempel på inputfil som använts som simuleringsmodell av konkallorimetern (ISO5660) i FDS5.

## D.1 Exempel på indatafil till FDS5, konkallorimeter (ISO5660)

```
&HEAD CHID='cone',TITLE='standard cone calorimeter' /
&MESH IJK=3,3,4, XB=-0.15,0.15,-0.15,0.15,0.0,0.4 / Mesh is just to make
FDS run
&TIME T_END=900., WALL_INCREMENT = 1, DT = 0.02 / Force FDS to do solid
phase calc every time step
&MISC TMPA=20.0, ASSUMED_GAS_TEMPERATURE =20.0, GAMMA= 1.4 /

&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3700 TIME_STEP_INCREMENT=1,/

&REAC ID='Wood(red oak)',
FYI='From SFPE Handbook 3rd ed. Table 3.4-14 and Table 3-4.16.
Radiative fraction = 0.37.',
C=1.00,
H=1.70,
O=0.72,
N=1.0000000E-003,
HEAT_OF_COMBUSTION=1.2400000E004,
CO_YIELD=4.0000000E-003,
SOOT_YIELD=0.0150/

&DUMP DT_DEVC=1.0000, DT_PROF=1.0000,DT_PL3D=1E6,SMOKE3D=.FALSE. /

&VENT XB=-0.05,0.05,-0.05,0.05,0.0,0.0, SURF_ID = 'SAMPLE' COLOR = 'BLUE'/
Test sample
&SURF ID = 'SAMPLE'
STRETCH_FACTOR = 0.500
CELL_SIZE_FACTOR = 0.500
THICKNESS(1) = 0.0120
MATL_ID(1,1) = 'LDFboard'
MATL_ID(1,2) = 'char'
MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.0000
MATL_MASS_FRACTION(1,2) = 0.0000
EXTERNAL_FLUX = 50.00
BACKING = 'INSULATED'
SHRINK = .TRUE.
TMP_INNER = 20.0 /

-----
Matl-rader nedanför, har uteslutits i indatafilen. Matl-rader redovisas
istället i Bilaga F.
-----

-----
Open up the domain on all sides except the bottom (ZMIN)
-----

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

-----  
Output  
-----

```
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'BURNING RATE', ID='burn' /
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX', ID='gauge'
/
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'RADIATIVE HEAT FLUX',
ID='radi' /
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'NET HEAT FLUX', ID='flux'/
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE', ID='temp'/
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'SOLID DENSITY',
MATL_ID='LDFboard', ID='LDFboard', DEPTH=0.001 /
&DEVC XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'SOLID DENSITY',
MATL_ID='char', ID='char', DEPTH=0.001 /

&PROF XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'DENSITY' /
&PROF XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
```

&TAIL/

-----  
Slut på inputfilen  
-----



# Bilaga E Indatafiler flamspridningssimuleringar

---

Följande bilaga redovisar exempel på indata-filer i FDS5 för de två flamspridningsscenario som simulerats i denna rapport, flamspridningsexperiment SP och ISO 9705 Room-Corner Test.

## E.1 Indata-fil flamspridningsexperiment SP

```
&HEAD CHID='IEC2cm', TITLE='IEC flame spread'/
&TIME T_END=300.00, WALL_INCREMENT=1/
&MISC TMPA=20.0, ASSUMED_GAS_TEMPERATURE=20.0, GAMMA= 1.4 /
&DUMP DT_RESTART=50.00/
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3000/

&MESH ID='MESH', FYI='2cm mesh', IJK=100,50,200,
      XB=0.00,2.00,0.00,1.00,0.00,4.00 MPI_PROCESS=0/

&REAC ID='Propane',
      FYI='From SFPE Handbook 3rd ed. Table 3-4.14',
      C=3.00,
      H=8.00,
      O=0.00,
      N=0.00,
      IDEAL=.TRUE.,
      HEAT_OF_COMBUSTION=4.6000000E006,
      CO_YIELD=5.0000000E-003,
      SOOT_YIELD=0.0240/
```

-----  
Matl-rader nedanför, har uteslutits i indatafilen. Matl-rader redovisas istället i Bilaga F.  
-----

```
&SURF ID='SAMPLE',
      FYI='Sample surface',
      RGB=146,202,166,
      STRETCH_FACTOR=0.500
      CELL_SIZE_FACTOR=0.500
      BACKING='INSULATED',
      MATL_ID(1,1)='MATL-NAME',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
      THICKNESS(1)=0.0120
      SHRINK=.TRUE. /
```

-----  
Burner  
-----

```
&SURF ID='Burner',
      FYI='20 kW IEC burner',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=1.9230769E003/
&SURF ID='ADIABATIC',
      COLOR='GRAY 80',
      ADIABATIC=.TRUE./
```

-----  
Devices  
-----

```
&DEVC ID='Wall temp0,25', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
      XYZ=0.1600,0.50,0.89, IOR=1/
```

## Bilaga E - Indatafiler flamspridningssimuleringar

---

```
&DEVC ID='Wall temp0,5', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.1600,0.50,1.14,
IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp0,6', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.1600,0.50,1.24,
IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp0,7', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.1600,0.50,1.34,
IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp0,8', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.1600,0.50,1.44,
IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp0,9', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.1600,0.50,1.54,
IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,0', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,1.64, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,1', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,1.74, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,2', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,1.84, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,3', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,1.94, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,4', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.04, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,5', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.14, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,6', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.24, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,7', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.34, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,8', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.44, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp1,9', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.54, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp2,0', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.64, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp2,1', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.74, IOR=1/
&DEVC ID='Wall temp2,2', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',
XYZ=0.1600,0.50,2.84, IOR=1/
&OBST XB=0.1200,0.1600,0.3600,0.66,0.4800,3.48, SURF_ID='SAMPLE' / Sample
&OBST XB=0.2000,0.4000,0.3800,0.64,0.68,0.72,
SURF_ID6='Burner', 'INERT', 'INERT', 'INERT', 'INERT', 'INERT' / Burner
&OBST XB=0.1200,0.1600,0.2600,0.3600,0.4800,3.48, SURF_ID='ADIABATIC' / Left
frame
&OBST XB=0.1200,0.1600,0.66,0.76,0.4800,3.48, SURF_ID='ADIABATIC' / Right
frame

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=2.00,2.00,0.0400,0.96,0.00,2.50 / Door
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.00,0.3000,0.00,1.00,4.00,4.00 / Ceiling vent

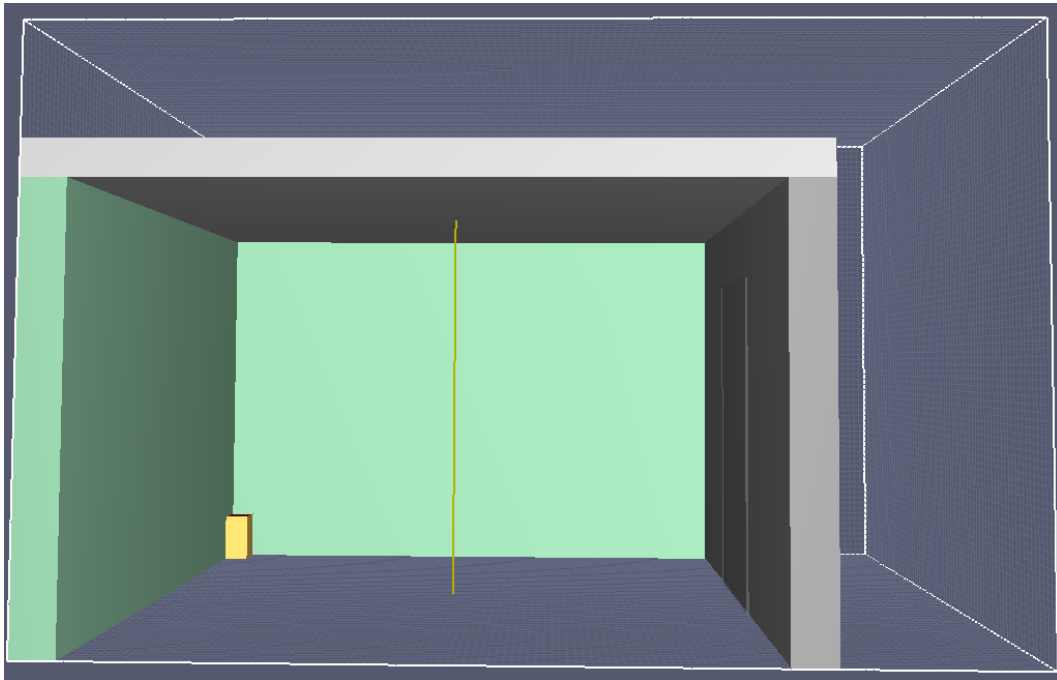
&BNDF QUANTITY='BACK WALL TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=0.50 /
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=0.50 /
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=0.50 /
&SLCF QUANTITY='oxygen', PBY=0.50 /
&TAIL/
```

-----  
Slut på inputfilen  
-----

## E.2 Indata-fil ISO 9705 Room-Corner test

En schematisk bild över modellen i FDS5 av ISO 9705 Room-Corner test redovisas i figur E-1.



**Figur E-1.** Schematisk bild över modellen i FDS5 av ISO 9705 Room-Corner test. I figuren har ena väggen gjorts osynlig för att kunna se in i rummet.

```
&HEAD CHID='ISO9705_4cm', TITLE='ISO9705 4cm' /
&TIME T_END=300.00, WALL_INCREMENT=1/
&DUMP DT_RESTART=50.00/
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3000/

&MESH ID='MESH', FYI='4cm mesh', IJK=128,72,80, XB=-0.2400,4.88,-
0.2400,2.64,0.00,3.20/

&REAC ID='Propane',
FYI='From SFPE Handbook 3rd ed. Table 3-4.14',
C=3.00,
H=8.00,
O=0.00,
N=0.00,
IDEAL=.TRUE.,
HEAT_OF_COMBUSTION=4.6000000E006,
CO_YIELD=5.0000000E-003,
SOOT_YIELD=0.0240/
```

-----

Matl-rader nedanför, har uteslutits i indatafilen. Matl-rader redovisas istället i Bilaga F.

-----

-----

MATL-rader för "cement", "brick" och "concrete".

-----

```
&MATL ID='Cement',
FYI='From Zou and Chow (2005)',
SPECIFIC_HEAT=1.05,
CONDUCTIVITY=1.12,
```

```

        DENSITY=1.8600000E003/
&MATL ID='Brick',
        FYI='From Zou and Chow (2005)',
        SPECIFIC_HEAT=0.92,
        CONDUCTIVITY=0.93,
        DENSITY=1.5600000E003/
&MATL ID='Concrete',
        FYI='From Zou and Chow (2005)',
        SPECIFIC_HEAT=0.92,
        CONDUCTIVITY=1.62,
        DENSITY=2.4000000E003/

&SURF ID='Walls',
        RGB          = 146,202,166,
        STRETCH_FACTOR  = 0.500
        CELL_SIZE_FACTOR    = 0.500
        MATL_ID(1,1)  = 'LDFboard',
        MATL_ID(2,1)  = 'Cement',
        MATL_ID(3,1)  = 'Brick',
        MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.00,
        MATL_MASS_FRACTION(2,1) = 1.00,
        MATL_MASS_FRACTION(3,1) = 1.00,
        SHRINK                = .TRUE.
        THICKNESS(1:3)  = 0.0120,0.0200,0.2200/

&SURF ID='Ceiling',
        COLOR  = 'GRAY 80',
        STRETCH_FACTOR  = 0.500
        CELL_SIZE_FACTOR    = 0.500
        MATL_ID(1,1)  = 'LDFboard',
        MATL_ID(2,1)  = 'Concrete',
        MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.00,
        MATL_MASS_FRACTION(2,1) = 1.00,
        SHRINK                = .TRUE.
        THICKNESS(1:2)  = 0.0120,0.2000/

-----
RWall surface and burner 100kW
-----
&SURF ID='RWall',
        COLOR='GRAY 60',
        MATL_ID(1,1)  = 'Cement',
        MATL_ID(2,1)  = 'Brick',
        MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.00,
        MATL_MASS_FRACTION(2,1) = 1.00,
        THICKNESS(1:2)  = 0.0200,0.2200/

&SURF ID='Burner',
        FYI='Sandbox burner. 100kW for 10 minutes then 300kW',
        COLOR='RED',
        HRRPUA=1.1718750E004,
        RAMP_Q='Burner_RAMP_Q' /
&RAMP ID='Burner_RAMP_Q', T=0.00, F=0.3333/
&RAMP ID='Burner_RAMP_Q', T=600.00, F=1.00/

&DEVC ID='LAYER->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=1.81,1.81,1.21,1.21,0.00,2.40/
&DEVC ID='LAYER->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=1.81,1.81,1.21,1.21,0.00,2.40/
&HOLE XB=3.59,3.85,0.80,1.60,0.00,2.00/ Door

```

```
&OBST XB=0.00,3.60,-0.2400,0.00,0.00,2.40, SURF_ID='Walls'/ Lower wall
&OBST XB=-0.2400,0.00,-0.2400,2.64,0.00,2.40, SURF_ID='Walls'/ Left wall
&OBST XB=0.00,3.60,2.40,2.64,0.00,2.40, SURF_ID='Walls'/ Upper wall
&OBST XB=-0.2400,3.84,-0.2400,2.64,2.40,2.60, SURF_ID='Ceiling'/ Ceiling
&OBST XB=3.60,3.84,-0.2400,2.64,0.00,2.40, SURF_ID='RWall'/ Right wall
&OBST XB=0.00,0.1600,2.24,2.40,0.00,0.3200,
SURF_IDS='Burner','INERT','INERT'/ Burner
```

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
```

```
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=1.20/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=1.20/
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBX=1.20/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.20/
```

```
&TAIL/
```

```
-----
Slut på inputfilen
-----
```



# Bilaga F Materialparametrar FDS5

---

Följande bilaga redovisar de materialparametrar som Gpyro Property Estimation Program funnit. För varje material lades dessutom det värde på HEAT\_OF\_COMBUSTION som använts vid simuleringarna i FDS5 till.

## F.1 LDF-skiva

```
&MATL ID = 'LDFboard'  
CONDUCTIVITY = 0.096  
DENSITY = 250.00  
SPECIFIC_HEAT = 2.13  
EMISSIVITY = 0.672  
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10  
RESIDUE(1) = 'char'  
A(1) = 0.3162E+09  
E(1) = 0.1399E+06  
N_S(1) = 1.38  
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00  
HEAT_OF_REACTION(1) = 342.81  
HEAT_OF_COMBUSTION = 1.123E004,  
NU_FUEL(1) = 0.900  
NU_RESIDUE(1) = 0.100  
NU_WATER(1) = 0.000  
N_REACTIONS = 1 /
```

```
&MATL ID = 'char'  
CONDUCTIVITY_RAMP = 'RAMP_01'  
DENSITY = 25.00  
SPECIFIC_HEAT = 1.31  
EMISSIVITY = 0.980  
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10  
N_REACTIONS = 0 /
```

```
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 20.0, F = 0.0737 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 70.0, F = 0.0883 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 120.0, F = 0.1032 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 170.0, F = 0.1184 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 220.0, F = 0.1338 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 270.0, F = 0.1495 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 320.0, F = 0.1654 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 370.0, F = 0.1814 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 420.0, F = 0.1977 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 470.0, F = 0.2141 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 520.0, F = 0.2307 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 570.0, F = 0.2475 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 620.0, F = 0.2643 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 670.0, F = 0.2814 /  
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 720.0, F = 0.2985 /
```

## F.2 MDF-skiva

```
&MATL ID = 'MDFboard'  
CONDUCTIVITY = 0.101  
DENSITY = 700.00  
SPECIFIC_HEAT = 2.18  
EMISSIVITY = 0.639  
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10  
RESIDUE(1) = 'char'  
A(1) = 0.2648E+09  
E(1) = 0.1307E+06  
N_S(1) = 1.26  
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00  
HEAT_OF_REACTION(1) = 199.53
```

```

HEAT_OF_COMBUSTION      = 1.198E004,
NU_FUEL(1)              = 0.923
NU_RESIDUE(1)          = 0.077
NU_WATER(1)            = 0.000
N_REACTIONS             = 1 /

&MATL ID                = 'char'
CONDUCTIVITY_RAMP      = 'RAMP_01'
DENSITY                = 53.67
SPECIFIC_HEAT          = 1.25
EMISSIVITY             = 0.968
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
N_REACTIONS            = 0 /

&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 20.0, F = 0.0802 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 70.0, F = 0.1030 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 120.0, F = 0.1279 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 170.0, F = 0.1547 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 220.0, F = 0.1834 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 270.0, F = 0.2139 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 320.0, F = 0.2460 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 370.0, F = 0.2798 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 420.0, F = 0.3152 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 470.0, F = 0.3521 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 520.0, F = 0.3906 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 570.0, F = 0.4304 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 620.0, F = 0.4718 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 670.0, F = 0.5145 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 720.0, F = 0.5585 /

```

### F.3 Spånskiva

```

&MATL ID                = 'particleboard'
CONDUCTIVITY            = 0.095
DENSITY                 = 700.00
SPECIFIC_HEAT           = 1.69
EMISSIVITY              = 0.665
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
RESIDUE(1)              = 'char'
A(1)                   = 0.9911E+08
E(1)                   = 0.1348E+06
N_S(1)                 = 1.40
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00
HEAT_OF_REACTION(1)    = 221.47
HEAT_OF_COMBUSTION      = 1.192E004,
NU_FUEL(1)              = 0.935
NU_RESIDUE(1)          = 0.065
NU_WATER(1)            = 0.000
N_REACTIONS             = 1 /

&MATL ID                = 'char'
CONDUCTIVITY_RAMP      = 'RAMP_01'
DENSITY                = 45.84
SPECIFIC_HEAT          = 1.40
EMISSIVITY             = 0.976
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
N_REACTIONS            = 0 /

&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 20.0, F = 0.0751 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 70.0, F = 0.0985 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 120.0, F = 0.1245 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 170.0, F = 0.1530 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 220.0, F = 0.1840 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 270.0, F = 0.2173 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 320.0, F = 0.2529 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 370.0, F = 0.2907 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 420.0, F = 0.3307 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 470.0, F = 0.3728 /

```



```

&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 520.0, F = 0.4171 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 570.0, F = 0.4634 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 620.0, F = 0.5117 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 670.0, F = 0.5620 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 720.0, F = 0.6143 /

```

## F.4 Plywood

```

&MATL ID = 'plywood'
CONDUCTIVITY = 0.155
DENSITY = 600.00
SPECIFIC_HEAT = 2.24
EMISSIVITY = 0.600
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
RESIDUE(1) = 'char'
A(1) = 0.1448E+10
E(1) = 0.1295E+06
N_S(1) = 1.34
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00
HEAT_OF_REACTION(1) = 168.33
HEAT_OF_COMBUSTION = 1.18E004,
NU_FUEL(1) = 0.810
NU_RESIDUE(1) = 0.190
NU_WATER(1) = 0.000
N_REACTIONS = 1 /

```

```

&MATL ID = 'char'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'RAMP_01'
DENSITY = 114.16
SPECIFIC_HEAT = 1.65
EMISSIVITY = 0.887
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
RESIDUE(1) = 'residue'
A(1) = 0.1805E+09
E(1) = 0.1959E+06
N_S(1) = 1.68
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00
HEAT_OF_REACTION(1) = 81.80
HEAT_OF_COMBUSTION = 1.18E004,
NU_FUEL(1) = 0.644
NU_RESIDUE(1) = 0.356
NU_WATER(1) = 0.000
N_REACTIONS = 1 /

```

```

&MATL ID = 'residue'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'RAMP_02'
DENSITY = 40.62
SPECIFIC_HEAT = 1.36
EMISSIVITY = 0.879
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
N_REACTIONS = 0 /

```

```

&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 20.0, F = 0.1155 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 70.0, F = 0.1413 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 120.0, F = 0.1682 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 170.0, F = 0.1960 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 220.0, F = 0.2248 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 270.0, F = 0.2544 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 320.0, F = 0.2847 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 370.0, F = 0.3158 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 420.0, F = 0.3475 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 470.0, F = 0.3799 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 520.0, F = 0.4130 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 570.0, F = 0.4466 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 620.0, F = 0.4807 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 670.0, F = 0.5154 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 720.0, F = 0.5507 /

```

```

&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 20.0, F = 0.0506 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 70.0, F = 0.0650 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 120.0, F = 0.0807 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 170.0, F = 0.0976 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 220.0, F = 0.1157 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 270.0, F = 0.1350 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 320.0, F = 0.1553 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 370.0, F = 0.1766 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 420.0, F = 0.1990 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 470.0, F = 0.2223 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 520.0, F = 0.2466 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 570.0, F = 0.2718 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 620.0, F = 0.2979 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 670.0, F = 0.3249 /
&RAMP ID = 'RAMP_02', T= 720.0, F = 0.3528 /

```

## F.5 Gran

```

&MATL ID = 'spruce'
CONDUCTIVITY = 0.118
DENSITY = 450.00
SPECIFIC_HEAT = 1.87
EMISSIVITY = 0.732
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
RESIDUE(1) = 'char'
A(1) = 0.1079E+10
E(1) = 0.1363E+06
N_S(1) = 0.78
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00
HEAT_OF_REACTION(1) = 226.42
HEAT_OF_COMBUSTION = 1.257E004,
NU_FUEL(1) = 0.601
NU_RESIDUE(1) = 0.399
NU_WATER(1) = 0.000
N_REACTIONS = 1 /

```

```

&MATL ID = 'char'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'RAMP_01'
DENSITY = 179.50
SPECIFIC_HEAT = 1.79
EMISSIVITY = 0.851
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
RESIDUE(1) = 'residue'
A(1) = 0.1064E+09
E(1) = 0.1984E+06
N_S(1) = 1.73
THRESHOLD_TEMPERATURE(1) = 0.00
HEAT_OF_REACTION(1) = 28.25
HEAT_OF_COMBUSTION = 1.257E004,
NU_FUEL(1) = 0.394
NU_RESIDUE(1) = 0.606
NU_WATER(1) = 0.000
N_REACTIONS = 1 /

```

```

&MATL ID = 'residue'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'RAMP_02'
DENSITY = 108.85
SPECIFIC_HEAT = 1.83
EMISSIVITY = 0.857
ABSORPTION_COEFFICIENT = 0.9000E+10
N_REACTIONS = 0 /

```

```

&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 20.0, F = 0.0929 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 70.0, F = 0.1100 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 120.0, F = 0.1272 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 170.0, F = 0.1446 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 220.0, F = 0.1621 /
&RAMP ID = 'RAMP_01', T= 270.0, F = 0.1798 /

```

---

&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 320.0, F = 0.1976 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 370.0, F = 0.2155 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 420.0, F = 0.2335 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 470.0, F = 0.2516 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 520.0, F = 0.2697 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 570.0, F = 0.2880 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 620.0, F = 0.3063 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 670.0, F = 0.3247 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_01', T= 720.0, F = 0.3432 /

&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 20.0, F = 0.0093 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 70.0, F = 0.0119 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 120.0, F = 0.0148 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 170.0, F = 0.0179 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 220.0, F = 0.0212 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 270.0, F = 0.0246 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 320.0, F = 0.0283 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 370.0, F = 0.0322 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 420.0, F = 0.0362 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 470.0, F = 0.0405 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 520.0, F = 0.0449 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 570.0, F = 0.0494 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 620.0, F = 0.0541 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 670.0, F = 0.0590 /  
&RAMP ID = 'RAMP\_02', T= 720.0, F = 0.0640 /