

Institutionen för brandteknik Lunds Tekniska Högskola Lunds Universitet



Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter

- En utvärdering

Maj 1998

Anders Edstam Peter Söderström Institutionen för brandteknik Lunds tekniska högskola Box 118 221 00 Lund

Department of Fire Safety Engineering Lund Institute of Technology Lund University Box 118 S-221 00 Lund Sweden

Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter

-En utvärdering

Methods for calculation of species production and layer burning

- An evaluation

Edstam, Anders Söderström, Peter

Brandingenjörslinjen vid Lunds tekniska högskola, 1998

ABSTRACT: An evaluation of methods for caluculation of species as CO and CO, layer burning and flashover in a singel room fire, using CFAST, correlation models, Beylers equation and A1 Flashover. The models are compared with performed experiments. Swedish

KEYWORDS: Layer burning, species production, CFAST, Yield, CO, CO₂, A1 Flashover, experiments

SAMMANFATTNING

Att kunna beräkna ett brandgaslagers egenskaper är av yttersta intresse, framförallt av två orsaker. Dels spelar det en avgörande roll om ett brandförlopp skall gå mot övertändning eller ej, och dels är det som bekant förbränningsprodukterna i brandgaslagret som orsakar merparten av de dödsfall som inträffar i samband med bränder.

I dagsläget finns ett antal olika metoder för att beräkna dessa fenomen. I det här arbetet har både handberäkningsmodeller och datormodeller analyserats och utvärderats. Resultaten från dessa har jämförts med två försöksserier där en mängd data uppmättes. Den ena försöksserien utfördes sommaren 1997 av L-G Bengtsson, Brandteknik LTH, medan den andra utfördes av rapportförfattarna själva under hösten 1997. Båda försöksserierna var s k modellskaleförsök där bränslet var heptan respektive metan.

De modeller som analyserades är:

- Beylers ekvation. Handberäkningsmodell för beräkning av brandgaslagrets antändlighet
- Flashover A1. Datormodell för att beräkna om risk för övertändning föreligger eller ej
- CFAST. Datormodell för beräkning av indata till Beylers ekvation samt förbränningsprodukter i brandgaslagret
- Handräkningsekvationer för beräkning av förbränningsprodukter

Beylers handberäkningsmodell bygger på brandgaslagrets kemiska sammansättning samt temperaturen i brandgaslagret. Modellen är en utveckling av Le Chateliers lag.

Flashover A1 är ett datorprogram som bygger på termiska förhållanden vid en brand. Genom att beräkna temperatur, brandradie och brandgaslagrets tjocklek räknar programmet fram om branden kan anses som instabil vilket innebär att risk för övertändning föreligger.

CFAST är ett datorprogram som används bl a för att simulera ett brandförlopp och är således inte ett program som direkt ger svar om någon risk för övertändning föreligger. Programmet kan dock indirekt användas genom att använda utdata från detta som indata i exempelvis Beylers modell. Därför analyseras även CFAST och de utdata man använder till Beylers modell, d v s temperatur och Φ -värde. Med Φ -värde menas den s k ekvivalenskvoten, d v s ett mått på brandens ventilationsförhållanden där ett Φ -värde större än 1 ger ventilationskontrollerad brand.

Dessutom analyseras vad CFAST ger för utdata av förbränningsprodukter som CO och CO_2 då även dessa medverkar till brandgaslagrets brännbarhet, samt att de är av stort intresse ur toxisk synvinkel. De resultat CFAST ger när det gäller förbränningsprodukter är i dagsläget ett relativt outforskat område.

Arbetet gav följande resultat:

En jämförelse av observationer vid försöken och en beräkningar av brandförloppen med Beylers ekvation visar mycket bra resultat. Nästan alla värden där utfallet från Beylers modell blev att brandgaslagret skulle vara brännbart var det också så i försöket. Även de värden där det inte skulle vara ett brännbart brandgaslager stämde väl överrens med verkligheten. Dock visade våra försök att det kan vara svårt att avgöra om ett brandgaslager är brännbart eller inte. Skillnaden utgörs snarare av ett intervall än en skarp skiljelinje. Slutsatsen blir att Beylers modell kan ses som ett vettigt komplement till de metoder man idag använder för att prediktera övertändning. Dock är metoden lite mer arbetskrävande än att använda tumregler som exempelvis temperaturen för att prediktera en eventuell övertändning, men ger i gengäld ett mer exakt resultat som tar hänsyn till även de kemiska aspekterna i brandgaslagret. Det bör också påpekas att en antändning av brandgaslagret inte är detsamma som en övertändning, även om det i alla fall i öppna rum är ett mycket karakteristiskt för förloppet mot en övertändning. Även när CFAST användes för att skapa indata till Beylers ekvation erhölls goda resultat, se nedan.

Datormodellen Flashover A1 anses vara mindre lämpligt sett som ett ingenjörsmässigt verktyg. I den nuvarande skepnaden är den totalt oanvändbar både vad det gäller användarvänlighet och resultatmässigt.

Från CFAST analyserades utdata som temperatur, Φ -värde (indirekt genom luftflödet och temperaturen) och förbränningsprodukterna CO och CO₂. När det gäller temperaturen ser man att CFAST har en klar tendens att överprediktera denna. Detta är även känt från tidigare studier (Lundin 1997). Resultatet vad gäller Φ -värdet visar på mycket god överensstämmelse med en felmarginal på ca 10 % större än det uppmätta.

Då Φ-värdet är den mest betydelsefulla parametern i Beylers ekvation är det ingen överraskning att man får goda resultat när man använder utdata från CFAST för att beräkna Beylers ekvation. Medelavvikelsen från beräkningar med uppmätta värden ligger på ca 10 %, vilket alltså innebär att man får ett mycket bra resultat genom att använda utdata från CFAST för beräkningar i Beylers ekvation.

När det gäller de resultat som CFAST ger för förbränningsprodukterna CO och CO₂ styr man detta själv till stor del genom att definiera förhållandet mellan dessa till programmet. I rapporten har tre olika metoder använts, med varierande resultat beroende på bl a tidpunkt i brandförloppet och Φ -värdet. Analysen visar att för att få så bra resultat som möjligt måste man välja metod med utgångspunkt från brandens ventilationsförhållanden (Φ -värde) och temperatur. Med den metod som sedan bedöms som den bästa ger CFAST ett resultat som i grova drag skiljer sig i medeltal 20% från de uppmätta, både vad det gäller CO och CO₂. Även detta får man betrakta som ett relativt bra resultat.

Handräkningsmodellen för förbränningsprodukter gav i stort sett identiska resultat med CFAST. Dock är CFAST till stor hjälp även vid handberäkning, då resultat från simuleringar i former av temperatur och Φ -värde ger större möjlighet för att skapa korrekt indata till handberäkningsmodellen.

SUMMARY

To be able to calculate the properties of a smoke layer is an utmost interest, mainly by two reasons. The properties of the hot upper layer is one of the major elements having an effect on whether a fire will grow to flashover or not, and also the fact that up to two thirds of the deaths in fires suffer from carbon monoxide poisoning makes it interesting.

Today there are a number of different methods to calculate these phenomena. This report deals with analysis and evaluation of both hand-calculation models and computer models. The results from the models are compared with two series of experiments. The first series of experiments was performed during the summer 1997 by L-G Bengtsson, Department of Fire Safety Engineering at Lund Institute of Technology, and the second series by the authors of this report during the autumn 1997. Both series were scale experiments about 1/3 of real ordinary dimensions. The fuel used were heptane respectively methane.

The methods of calculation that are evaluated are:

- Beyler's equation. A hand-calculation method used to determine the flammability of the smoke layer
- Flashover A1. A computer model used to predict flashover
- CFAST. A computer model. In this report used to get input to Beyler's equation and calculation of species in the smoke layer.
- Hand-calculation equations for calculation of species in the smoke layer

Beyler's equation is a development of the rule of Le Chatelier and considers both the chemical composition and the temperature of the upper layer to determine whether it's flammable or not.

Flashover A1 is a pure thermal two-zone model. By calculation of temperature, the radii of the fire and the thickness of the upper layer an eigenvalue is formed which can tell if a flashover is likely to occur.

CFAST is a two-zone model for simulation of a compartment fire. The program itself doesn't provide any function for calculation of flashover or layer burning, but it can be used to create input to for instance Beyler's equation. Thus the parameters temperature and Φ -value (i.e. pyrolysis together with massflow into the compartment) were evaluated. Also the CFAST calculation of the species CO and CO₂ in the smoke layer was evaluated. The latter thing is today a subject that has not been focused very much in research about the model limitations.

The work ended up in following results:

A comparison between observations at the experiments and calculations with Beyler's equation showed that the equation is a good method to predict whether the upper layer will be flammable or not. Almost all the experiments where Beyler's equation predicted that the upper layer would ignite did so. Also for the experiments that didn't give an ignition of the layer the equation's predictions hold true. The experiments showed however that there is a difficulty to decide exactly when a layer goes from not burning to burning. The difference is more an interval than a sharp limit. The conclusion from the equation is that it is a good way to determine whether the upper layer will be flammable or not. It is demanding a bit more effort than for instance saying that a layer temperature above 600°C means flashover, but

gives a more realistic result including consideration to both temperature and chemical composition in the layer. To avoid misunderstanding we would like to state that an ignition of the upper layer is not the same as a flashover, though the layer burning at least in open compartments is a very characteristic phenomenon in the process leading to flashover. Also when CFAST was used to create input to Beyler's equation the results were good, see below.

The computer model A1 Flashover is considered as a poor tool for engineering purposes. The evaluated version is almost totally impossible to use both regarding user-friendliness and the results from the simulations.

The CFAST model was evaluated in terms of a number of parameters; temperature, Φ -value (indirectly by temperature and mass flow), the species CO and CO₂ in the upper layer. The temperature predicted by CFAST was generally higher than the temperature measured in the experiments. This is a known matter since earlier studies (Lundin 1997). The Φ -value was found to be calculated very good by the CFAST model, the deviation from the measured values was in average less than 10%.

Considering the fact that the Φ -value both is the most important input parameter to Beyler's equation and calculated well by CFAST, the conclusion is that using CFAST to create input to the equation will give good results. The somewhat higher temperatures predicted by CFAST have a comparatively small effect on the result of Beylers equation. In a comparison between calculating Beyler's equation by using data from the experiments and data from CFAST as input, the mean value of the deviation turned out to be approximately 10%.

When using CFAST to calculate species as CO and CO₂ in the upper layer, the results are depending highly on the given input. The most important parameters are the rate of pyrolysis and the CO/CO₂-fraction. To decide the CO/CO₂-fraction three different methods have been used in this report. The results showed that the correctness of the calculations with the different methods varies with both temperature, Φ -value and time from fire start. The conclusion is therefore the following. In order to get an accurate calculation of concentrations of species in the upper layer the method used to create input must be chosen depending of the characteristics of the fire. By using the best available method for a particular fire, the results from CFAST deviate approximately 20% from the measurements in the experiments.

The hand-calculation equations for species gave very similar results to the ones given by CFAST. Nevertheless CFAST can be a good tool even for hand-calculation. The result from a simulation in terms of temperature and Φ -value makes the decision of input to the hand-calculation equations much easier.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	9
1.1	SVETE	9
1.2	METOD	9
1.3	AVGRÄNSNINGAR	9
1.4	Erkännanden	9
2	BAKGRUND	11
	Dimonol D	
2.1	ANTÄNDNING AV BRANDGASLAGRET OCH ÖVERTÄNDNING	11
2.2	FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER	13
2.3	INLEDANDE TEORIER	14
2.3.1	EKVIVALENSKVOT	14
2.3.2	METODER FÖR ATT BESTÄMMA KONCENTRATION AV FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER	15
2.3.3	BERAKNING AV YIELDER	18
3	EXPERIMENTELL DATA	23
3.1	BESKRIVNING AV FÖRSÖKEN	23
3.1.1	BESKRIVNING AV FÖRBRÄNNINGSKAMMAREN	23
3.1.1.1	Metanförsöken	23
3.1.1.2	Heptanförsöken	24
3.1.2	MÄTNING AV MASSFLÖDE	25
3.1.2.1	Metanförsök	25
3.1.2.2	Heptanförsök	25
3.1.3	MÄTNING AV TEMPERATUR	25
3.1.3.1	Metanförsök	25
3.1.3.2	Heptanförsök	26
3.1.4	MATNING AV BRANDGASER	26
3.1.5	MÄTNING AV FÖRBRÄNNINGSGASER	27
3.2	BEGRÄNSNINGAR VID FÖRSÖK	28
3.2.1	HEPTANSERIEN	28
3.2.2	METANSERIEN	29
3.3	BERAKNING AV MATVARDEN	29
3.3.1	BERAKNING AV MASSFORLUST	29
3.3.1.1	Heptanserien	29
3.3.1.2	Metanserien	30
3.3.2	BERAKNING AV MEDELTEMPERATUR I OVRE BRANDGASLAGRET	32
3.3.3	BERAKNING AV EKVIVALENSKVOT (Φ -VARDE)	32
3.3.4	BERAKNING AV YIELDER	34
3.3.5	BERAKNING AV RHR	34
3.3.6	BERAKNING AV FORBRANNINGSEFFEKTIVITET	36
4	BERÄKNINGSMETODER FÖR ANTÄNDNING AV BRANDGASLAGRET OG	<u>CH</u>
<u>ÖVER'</u>	TÄNDNING	37
41	REVIERS EKVATION	27
4.1.1	TEORI	37
	- 2014	51

4111	Grunderna för Beylers ekvation	37
4 1 1 2	Beylers förenkling	38
4 1 1 3	Generalisering av Beylers ekvation	40
4.1.1.5	Begränsningar för Beylers ekvation	40
4 1 2	LÄMEÖRELSE RERÄKNING/EXPERIMENT	41
4 1 2 1	Jämförelse med det visuella intrycket	42
4122	Förändring av temperaturprofilen vid antändning	42
4.1.2.2	Sluteate	44
4.1.2.3	FI ASHOVED A 1	40
421	TEARI	47 47
422	SVNDINKTER	48
4221	Användarvänlighet	40
4.2.2.1	Beräkningarnas relevans	40
4.2.2.2	St LITE ATS	4) 50
4.2.5	CFAST	51
431	BESKRIVNING AV HAZARDPAKETET	51
4311	CEAST	51
4312	CEdit	51
432	UTVÄRDERING AV BERÄKNINGAR	52
4321	Val av representativa värden	53
4322	Temperatur	53
4.3.2.2	Fkvivalenskvot (D -värde)	54
4324	Bevlers ekvation	57
4.3.2.4	Deylers exvarion	51
-		50
5	METODER FOR BERAKNING AV FORBRANNINGSPRODUKTER	59
5.1	FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER	59
5.2	URVALSMETOD	59
5.3	BERÄKNINGSMETODER	59
5.4	UTVÄRDERING CO	62
5.4.1	Försökens tidiga skede	62
5.4.2	Försökens sena skede	65
5.5	UTVÄRDERING CO2	67
5.5.1	FÖRSÖKENS TIDIGA SKEDE	67
5.5.2	Försökens sena skede	69
5.6	SLUTSATSER	71
5.6.1	CO-beräkningar	71
5.6.2	CO ₂ -beräkningar	72
5.7	INGENJÖRSMÄSSIGA REKOMMENDATIONER	72
0	KEFEKENSFUKTEUKNING	75

BILAGOR

BILAGA A	TEMPERATUR BERÄKNAD M H A CFAST OCH UPPMÄTTA VÄRDEN FRÅN FÖRSÖK
BILAGA B	 -värde beräknat m h a CFAST och uppmätta värden från försök
BILAGA C	BEYLERS EKVATION BERÄKNAD M H A CFAST OCH UPPMÄTTA VÄRDEN FRÅN FÖRSÖK
BILAGA D	CO-KONCENTRATION BERÄKNAD OCH UPPMÄTT VID FÖRSÖK
BILAGA E	CO ₂ -koncentration beräknad m h a CFAST och uppmätta värden vid försök
BILAGA F	BESKRIVNING AV FÖRSÖK

1 Inledning

Följande rapport är resultatet av ett elevarbete i kursen Problembaserad Brandteknisk Riskhantering vid brandingenjörslinjen vid Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet. Rapporten behandlar metoder för att räkna på om ett brandgaslager är antändbart eller ej (Beylers handräkningsmodell), övertändning (Flashover A1) samt metoder för att bestämma brandgaslagrets sammansättning av förbränningsprodukter (handberäkningsekvationer och CFAST).

1.1 Syfte

Syftet med kursen är att visa elevernas förmåga att använda de kunskaper som eleverna har skaffat sig under utbildningen samt att självständigt analysera och redovisa en relativt omfattande uppgift på ett vetenskapligt metodiskt sätt.

Syftet med arbetet har varit att utreda de undersökta modellernas giltighet vid olika förhållanden och därigenom få vetskap om hur indata till modellerna bäst skapas.

1.2 Metod

Arbetet har bestått av att jämföra och analysera mätdata från två olika modellskaleförsök med de resultat som olika beräkningsmetoder ger. Vid arbetet har ett par olika datormodeller använts. Dessutom har en mängd olika mätdata bearbetats på olika sätt med datorns hjälp.

För att finna lämpliga metoder som kan användas för indata till datorberäkningar har även viss litteraturstudie bedrivits.

De försök som behandlas har båda utförts vid Institutionen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola.

1.3 Avgränsningar

Arbetet är begränsat till vad som sker i brandrummet och ingen hänsyn tas till vad som sker utanför detta. Vidare är det endast de dominerande förbränningsprodukterna CO_2 och CO som analyseras. En annan begränsning är att olika kemiska processer som sker vid en förbränning endast behandlas ytligt då detta ej heller är syftet med denna rapport. Vidare har endast två typer av bränsle använts i försöken, heptan och metan.

Det bör också påpekas att på grund av att de utförda försöken är s k modellskaleförsök måste hänsyn till skalningseffekter tas när modellerna appliceras på verkliga förhållanden. Hur sådana skalningseffekter kan komma att påverka resultaten utreds inte i denna rapport.

Vissa av de mätvärden av CO-koncentrationen som erhölls i försöksserierna måste behandlas med försiktighet då vissa försök kom att hamna utanför utrustningens mätområde. Förmodligen är felen inte alltför betydande, men alla CO-koncentrationer större än 1 vol% bör betraktas som något osäkra.

1.4 Erkännanden

Ett stort tack vill vi rikta till alla de som hjälpt oss i vårt arbete. Främst är det vår handledare Lars-Göran Bengtsson, ingenjör Sven-Ingvar Granemark, doktor Björn Karlsson samt övrig personal vid institutionen för brandteknik som varit oss behjälpliga. Dessutom får man rikta ett tack till fru och sambo som stått ut med oss under de alla timmar vi har förbrukat framför datorn.

2 Bakgrund

Detta kapitel har som största syfte att ge läsaren lite bakgrundsfakta och inledande teorier om begrepp och metoder som förekommer och används i rapporten. I de följande avsnitten kommer därför följande att tas upp:

- En kort diskussion inom begreppen övertändning/antändning av brandgaslagret
- Introduktion till arbetet med förbränningsprodukter
- Förklaring av begreppet ekvivalenskvot (Φ-värde)
- Teorier och metoder för att bestämma förbränningsprodukter

2.1 Antändning av brandgaslagret och övertändning

Möjligheten att förutbestämma om man kommer att få en övertändning eller inte vid en brand är intressant ur en rad olika aspekter, allt från rent insatsmässiga där en övertändningen oftast utgör gränsen mellan att det är möjligt att rädda liv och att inga möjligheter till detta finns, till rent byggnadsmässiga där en övertändning snabbt påskyndar den termiska påverkan av byggnadsdelar samt påskyndar brandspridningen radikalt.

Beräkningsmässigt finns det en rad olika metoder för att försöka bestämma om man kommer att få en övertändning eller ej. Oavsett vilken metod man använder är det viktigt att man har klart för sig vad skillnaden mellan en antändning av brandgaslagret och begreppet övertändning innebär.

Men vad innebär då begreppet övertändning? Frågan är inte helt lätt att besvara och idag råder det en hel del förvirring över vad begreppet egentligen innebär. Termer som mager/fet övertändning, rollover, backdraft, brandgasexplosion mm förekommer alla när det gäller övertändning. Vissa menar att redan när man får en antändning av brandgaslagret så är detta en övertändning. På räddningsverkets skolor arbetar man med s k övertändningscontainrar där man lär ut kännetecken hur det ser ut när man får en "övertändning", och vilken släckteknik man bör använda i ett sådant skede. I detta fall innebär begreppet övertändning att man får en antändning av oförbrända gaser i brandgaslagret. Detta är dock något som håller på att förändras till förmån för en mer standardiserad definition av begreppet övertändning.

Helt klart är att när det gäller övertändning så är den styrande processen en diffusionsflamma och inte någon förblandad flamma, eller uttryckt på ett annat sätt kan man säga att bränslet till förbränningen är skilt från syret och dessa blandas inte förrän i själva flamman. Därmed har övertändning inget att göra med förblandade gaser. Detta innebär vidare att man inte kan använda ord som mager eller fet övertändning. Dessutom är det därmed felaktigt att använda begrepp som förbränningshastighet, brännbarhetsgränser o s v för att beskriva en övertändning (Bengtsson & Karlsson 1997).

Internationellt finns ett antal olika definitioner på begreppet övertändning, vilka dock är mycket snarlika varandra. Fire Reasearch Station ger följande definition:

"Under en rumsbrand kan det inträffa ett stadium där den termiska strålningen från branden, de varma gaserna och de varma väggarna orsakar att allting i brandrummet pyrolyseras. Detta plötsliga och sammanhängande övergångsstadium av ökande brand kallas övertändning." (Chitty 1994) Av denna definition framgår det att övertändningen egentligen är en övergångsperiod mellan den växande initialbranden till den fullt utvecklade branden då allting i rummet brinner. Det skall dock påpekas att övertändning ej antas ha skett förrän den fullt utvecklade branden har nåtts.

Även om en antändning av brandgaslagret per definition inte direkt innebär en övertändning, så är detta fenomen fortfarande intressant. Dessa båda faktorer samspelar i hög grad med varandra, och en antändning av brandgaslagret kan i alla fall för öppna brandrum anses som karakteristiskt för övertändningsprocessen. En antändning av brandgaslagret medför att den externa strålningen mot bränsleytor ökar dramatiskt vilket i sin tur leder till att övertändning inträffar. I ett helt stängt rum är det däremot mera tveksamt om en antändning av brandgaslagret medför en övertändning.

Processerna som sker i brandgaslagret vid en förbränning är ganska komplicerade. Dock är det ganska klart att det till största delen är de kemiska processerna som styr förbränningen i brandgaslagret, medan man i samband med övertändning och den fullt utvecklade branden ofta talar om en kombination av kemiska och termiska processer.

Det som styr om ett brandgaslager blir brännbart eller inte är alltså till stor del den kemiska sammansättningen av brandgaslagret. Detta kan beräknas med hjälp av t ex Beylers modell, och ett av syftena med den här rapporten är att kontrollera dess giltighet. Modellen bygger på förhållandet mellan bränsle och luft samt på temperaturen i brandgaslagret. Med andra ord tas det indirekt hänsyn till de kemiska processer som sker vid en förbränning. Det är dock viktigt att återigen påpeka att förbränningen inte sker som en förblandad gas/luft blandning utan som en utveckling av en flamma på ytan mellan brandgaslagret och luften under detta. Denna brand på undersidan av brandgaslagret skapar här en instabilitet p g a av att den brinnande gasmassan värms upp och blir är varmare än det överliggande brandgaslagret, vilket i sin tur medför en turbulens på undersidan av brandgaslagret som blandar in varma brandgaser och luft i brandgaslagret. Fenomenet kallas ibland för "rollover". Förloppet fortsätter med att den brinnande gasen expanderar och eventuellt passerar ut genom öppningar för att där producera externa flammor (Bengtsson & Karlsson 1997).

Processen som beskrivits ovan är ofta ett steg i processen mot övertändning. Som det nämnts tidigare handlar det vid en övertändning främst om den termiska strålningen som sker från flammorna i brandgaslagret och de varma brandgaserna. En antändning av brandgaslagret medför en kraftig ökning av återstrålningen som i sin tur leder till en ökning av pyrolyseringen av allt bränsle i rummet, slutligen resulterande i att allt brännbart i rummet antänds och brinner. Ett brandförlopp kan alltså ses som en kedja av händelser som eventuellt leder fram till att en övertändning sker. Nedan visas ett flödesschema över hur en initialbrand kan leda fram till att en övertändning:

En brand uppstår som börjar producera brandgaser \Rightarrow branden växer \Rightarrow ökad mängd brandgaser \Rightarrow brandgaslagret växer \Rightarrow minskad syretillförsel till branden \Rightarrow större mängd oförbrända gaser bildas \Rightarrow brandgaslagret värms upp av brandhärden samt att mindre mängd kall luft tränger in i plymen då brandgaslagret sjunker \Rightarrow ökad återstrålning från brandgaslagret \Rightarrow ökad pyrolys av bränslet \Rightarrow ökad mängd oförbrända gaser i brandgaslagret osv. osv. Detta förlopp kan gå mycket snabbt i slutet.

Genom att studera mätvärden från de utförda heptanförsöken kan man se hur den ökade återstrålningen påverkar pyrolysen mycket tydligt.

2.2 Förbränningsprodukter

Att kunna bestämma de olika förbränningsprodukter som bildas vid en brand är främst intressant p g a av de toxiska effekter många av förbränningsprodukterna har. Framförallt orsakar CO-förgiftning en mycket stor andel, ca två tredjedelar, av de dödsfall som inträffar i samband med bränder. Kännedom om brandgaslagrets kemiska sammansättning är även intressant ur den aspekten att detta är en av de parametrar som styr brandgaslagrets antändbarhet. En del av denna rapport behandlar därför detta ämne i form av en utvärdering av de resultat som datorprogrammet CFAST ger vad gäller olika förbränningsprodukter och då främst CO och CO₂. Tillika utförs även handberäkningar för att bestämma COkoncentrationen.

Vid en förbränning av ett bränsle är det tillgången på luft, eller Φ -värdet som det också kan uttryckas, som till stor del styr de olika förbränningsprodukternas halter i brandgaserna. Det är dock inte sant att ett Φ -värde under 1 automatiskt innebär en fullständig förbränning då en förbränning av ett bränsle är en komplicerad process och det finns fler parametrar som styr hur väl ett bränsle kommer att förbrännas. Dock har det visat sig att man med ganska bra resultat kan uttrycka förbränningsprodukterna som en funktion av Φ -värdet. Detta behandlas mer i kapitel 2.3.2, sidan 15.

Om en brand skulle beskrivas kemiskt med reaktionsformler skulle resultatet visa en mycket komplicerad process. Ett stort antal ämnen är inblandade, bl a CO, CO₂, TUHC¹ och O₂. Utan att gå in på exakta hur reaktionerna går till i en brand kan det konstateras att det mellan dessa ämnen råder en massbalans i brandrummet i avseende på mängden kol, syre, väte o s v. När det gäller O₂ är det framförallt koncentrationen i det övre brandgaslagret som är intressant, då detta till viss del påverkar förhållandet mellan de förbränningsprodukter som kommer att uppstå i detta lager. Försöksdata visar tydligt att CO-halten stiger markant samtidigt som O₂-halten sjunker i det övre brandgaslagret.



Diagram 1. Koncentrationer för O_2 resp. CO för ett typiskt metanförsök. Värdena hämtade från metanförsök 9.

¹ Total unburned hydro carbon, dvs oförbrännda kolväten

2.3 Inledande teorier

För att beräkna om man kan få en antändning i brandgaslagret kan man exempelvis använda sig av Beylers ekvation (ekvation 35, s 40). Ekvationen som är en utveckling av Le Chateliers lag (ekvation 27, s 37) innehåller även begreppet ekvivalenskvot (Φ -värde). Detta begrepp är möjligen inte helt självklart för alla och förklaras därför mer ingående nedan. Ekvivalenskvoten förekommer även när det gäller att bestämma de förbränningsprodukter som uppstår vid en brand.

2.3.1 Ekvivalenskvot

Tillgången till syre har som bekant en stor inverkan på ett brandförlopp. Detta styrs i sin tur av hur stora öppningar som finns i brandrummet så att luft kan strömma in, eller med andra ord vilka ventilationsförhållanden som råder. Ett sätt att beskriva ventilationsförhållandena i en brand är med hjälp av begreppet ekvivalenskvot, ibland även kallat Φ -värde (phi). Ekvivalenskvoten definieras enligt följande ekvation:

$$\Phi = \frac{m_f / m_a}{r}$$
ekvation 1
där Φ = ekvivalenskvot [kg/kg]
 m_f = massan bränsle [kg]
 m_a = massan luft [kg]
 $r = m_f / m_a$ vid stökiometriska förhållanden [kg/kg]

Uppbyggnaden av ekvation 1 ovan ger att då;

- $\Phi < 1$ är branden bränslekontrollerad
- $\Phi > 1$ är branden ventilationskontrollerad

Det stökiometriska förhållandet bränsle/luft beräknas via reaktionsformeln för fullständig förbränning av det aktuella bränslet enligt följande exempel:

$$C_7H_{16} + 11(O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 7 CO_2 + 8 H_2O + 41,36 N_2$$

Detta ger följande resultat:

$$m_f = 7 \times 12,01 + 16 \times 1,01 = 100,23 \text{ g}$$

$$m_a = 11(2 \times 16 + 3,76 \times 2 \times 14,01) = 1510,91 \text{ g}$$

$$r = m_f/m_a = 100,23/1510,91 = 0,066 \qquad [g_f/g_a]$$

Ekvivalenskvoten har som synes en stor betydelse för hur väl ett bränsle förbränns. Om branden har god tillgång till syre (Φ <1), medför detta att förbränningsprodukterna till stor del endast betår av CO₂ och H₂O. Är syretillgången istället begränsad (Φ >1), blir resultatet en ofullständig förbränning av bränslet. Diverse restprodukter såsom CO, H₂ och HC² kommer att bildas vilka följer med brandgaserna till det övre brandgaslagret. I tillräckligt stora koncentrationer kan dessa restprodukter medföra att det övre brandgaslagret blir brännbart, med risk för mycket snabba brandförlopp som följd.

² Oförbrända kolväten

Försök har visat att produktionen av olika förbränningsprodukter som t.ex. CO, CO_2 och HC ganska väl kan uttryckas som en funktion av ekvivalenskvoten. Detta leder i sin tur att man med kända ventilationsförhållanden och bränslemängder kan utnyttja detta samband för att förutspå koncentrationer av ovan nämnda ämnen i brandgaslagret och i förlängningen även brandgaslagrets antändlighet.

Ekvivalenskvoten kan beskrivas på olika sätt. Den metod vi använder oss av tar endast hänsyn till mängd inströmmande luft till brandrummet och massflödet av bränsle. I rummet antas inga betydande variationer av ekvivalenskvoten föreligga och därför kallas detta värde den globala ekvivalenskvoten. Andra metoder för mer exakt bestämning av ekvivalenskvoten kan t ex vara att beräkna plymekvivalenskvoten eller att m h a CFD-modeller beräkna den för en bestämd punkt i rummet. Den globala ekvivalenskvoten kan ses som ett slags medelvärde av de verkliga ekvivalenskvoterna i rummet. I fortsättningen kommer vi att använda oss av uttrycket Φ -värde istället för ekvivalenskvot.

2.3.2 Metoder för att bestämma koncentration av förbränningsprodukter

För att bestämma halten av förbränningsprodukter finns i litteraturen en rad olika förslag på hur man kan räkna på detta, bl.a. i form av så kallade yielder³. De enklaste förslagen rekommenderar olika yielder för olika typer av bränder. Mulholland rekommenderade exempelvis efter att ha studerat ett antal fullskaletester, att man vid en välventilerad brand kan använda en Y_{CO} (yield CO) på 0,002 g/g samt en Y_{CO} på 0,3 g/g vid en underventilerad brand (Mullholland 1990). Nästa sätt för att bestämma halten av förbränningsprodukter bygger på härledda uttryck från en rad olika experiment. Gottuk visar med hjälp av experiment utförda av Beyler m fl att yielder på förbränningsprodukter från olika experiment med en rad olika bränslen korrelerar väl mot Φ -värdet (Gottuk & Roby 1995). Nedan visas resultat från försök utförda av Beyler i ett s k huvexperiment med propan.

³ Massan av en förbränningsprodukt som produceras per massa brunnet bränsle. Någon bra översättning på ordet yield har vi inte funnit så vi använder detta ord i fortsättningen.



Diagram 2, 3, 4 och 5. Exempel på hur olika förbränningsprodukter korrelerar med Φ -värdet. Försök med propan som bränsle utförda av Beyler (Gottuk & Roby 1995).

Resultatet presenteras i form av en normaliserad yield (Y_n) enligt ekvation 2 nedan.

$$Y_n = \frac{Y_i}{Y_{i,\max}}$$
 ekvation 2

där
$$Y_i$$
 = yield av förbränningsprodukten i[g/g] $Y_{i,max}$ = teoretiskt maximal yield av produkt i vid förbränning[g/g]

T ex för propan blir $Y_{CO,max}$ = 1,91 g/g, dvs alla kolmolekyler producerar endast CO och ingen CO₂.

Diagrammen ovan gäller endast då propan används som bränsle. Andra bränslen visar dock liknande resultat, och sättet att använda Φ -värdet för att bestämma de vanligaste förbränningsprodukter ger därför ett hyfsat resultat. Det har genom försök visat sig att den normaliserade yielden Y_n är mer bränsleberoende än den direkta yielden Y_i . Bl a har Gottuk därför föreslagit användning av Y_{CO} direkt som funktion av Φ -värdet, se diagram 6 och 7 nedan. Detta sätt att räkna används senare då Y_{CO} skall beräknas (Gottuk & Roby 1995).



Diagram 6 och 7. Y_{CO} som funktion av Φ -värdet för några olika bränslen. Diagrammen bygger på försök utförda av Beyler (Gottuk & Roby 1995).

Ur ovanstående diagram kan man med hjälp av enkla ekvationer som beskrivs beräkna Y_{CO} , se ekvation 3 till 7, s 19.

Beyler utförde ett s k huvtest, vilket inte riktigt kan liknas vid de förhållanden som uppstår vid en brand i ett rum. För att se om liknande förhållanden uppstår vid en rumsbrand utförde Gottuk m fl även tester under mer rumslika förhållanden, s k modellskaleförsök (jfr försöken utförda i denna rapport). En stor skillnad mellan dessa båda testmetoder är framförallt att i ett modellskaleförsök erhålls högre temperaturer då den mesta strålningsvärmen mot väggar och tak inte försvinner utan hjälper till att värma upp det övre brandgaslagret, och som en följd av detta ökar även återstrålningen mot bränslet med en högre förbränningshastighet som följd. Detta gäller framförallt vid en verklig brand samt i försök där icke gasformigt bränsle används. Nedan visas resultat där hexan används som bränsle från Beylers huvexperiment samt modellskaleförsök som är utförda av Gottuk (Gottuk et al. 1992).



Diagram 8. Skillnad på Y_{CO} vid modellskaleförsök "equation 15" respektiv huvförsök "equation 14" (Gottuk & Roby 1995).

Skillnaden mellan de båda försöksserierna är helt enkelt temperatureffekter. Detta förklaras av att i temperaturintervallet mellan 800-900 K skiftar reaktionshastigheten av oxidationen från CO till CO₂ från att vara en ganska långsam reaktion till en mycket snabb reaktion (Gottuk et al. 1992; Gottuk & Roby 1995). Då oxidationen av bränslet först resulterar i produktion av CO vilken sedan oxideras vidare till CO₂, ger detta att lägre temperaturer (< 875 K) kommer att medföra att endast en liten del av det CO som produceras oxideras vidare till CO₂. Detta får till följd att högre koncentrationer av CO erhålls vid lägre temperaturer. Tendenser till detta kan även utläsas av våra egna försök. I de flesta försöken stiger CO-halten snabbt till ett

toppvärde för att sedan sjunka under försökets gång i och med att temperaturen stiger. Vad detta exakt beror på har inte utretts. Tänkbara förklaringar kan vara ovan nämnda temperatureffekter, CO-molekylernas uppehållstid i brandgaslagret och överskattning av CO-koncentrationen i mätningarna p g a av extrapolering utanför mätinstrumentets kalibrerade värde (1,0 vol%). Nedan visas hur CO-halten varierar med tiden för några typiska metanförsök.



Diagram 9. Volymfraktionen CO i brandgaslagret som funktion av tiden för några metanförsök.

CO-halten beror även till viss del på vilken typ av bränsle man har. I de flesta fall har dock detta inte någon större betydelse, utan i de fall man uppmätt avvikelser i olika försök antas det bero på temperaturen. I fall med mycket låga syrgaskoncentrationer i brandgaslagret har dock ett relativt kraftigt bränsleberoende konstaterats. När bränslet då själv innehåller syre kan man klart utläsa att Y_{CO} är högre än då bränslet inte innehåller syre. Ett speciellt fall då mycket höga halter av CO har uppmätts, upp till 14 vol%, är då väggar och tak klätts med trä. Detta kan förklaras av syret i träet tillåter pyrolys till CO även i mycket syrefattiga miljöer. Då inget syre finns tillgängligt, varken i brandgaslagret eller i bränslet, kan naturligtvis inga ämnen som innehåller syre bildas vid den termiska nedbrytningen. Alltså kommer pyrolysen i en sådan miljö resultera i en mängd kolväten, men nästan inget CO (Gottuk & Roby 1995).

2.3.3 Beräkning av yielder

Yielderna av de olika förbränningsprodukterna används för att kunna beräkna fram koncentrationer av de förbränningsprodukter som man är intresserad av. Ur toxicitetssynpunkt är det då främst CO som är av intresse. I detta arbete har yielderna främst använts som indata till CFAST för att se om man kan beräkna CO-halten på ett bra sätt med hjälp av programmet.

Det finns flera olika förslag till hur man skall beräkna yielder av förbränningsprodukter. Några sätt är enkla, medan andra bygger på mer komplicerade ekvationer i vilka det även tas hänsyn till temperaturberoendet som beskrivs ovan för att bestämma CO-halten. I diagram 8 ovan finns två olika kurvor inritade, *equation 14* och *equation 15* med ekvationsnummer från Gottuks publikation (Gottuk et al. 1992). Dessa båda kurvor representerar olika ekvationer som skall användas beroende på vilken temperatur man har i det aktuella brandgaslagret. *Equation 14* motsvaras av ekvation 3 nedan och används då temperaturen är < 875 K medan *equation 15* motsvaras av ekvation 4 och används för temperaturer > 875 K. De bägge ekvationerna bygger på hexanförsök från Beylers huvförsök respektive rumsförsök utförda av Gottuk m fl (Gottuk et al. 1992). Ekvationerna är anpassade efter de lägsta uppmätta värdena från respektive försök, d v s man kan använda dessa som en undre gräns för beräkningar av Y_{CO} . Det är denna metod som i fortsättningen benämns "tangens yieldberäkning".

För T_g<875 K:

$$Y_{co} = \left(\frac{0.19}{180}\right) \times \tan^{-1}(X) + 0.095$$
 ekvation 3
där X = 10(Φ -0.8) uttryckt i grader [°]

För T_g>875 K:

$$Y_{CO} = \left(\frac{0.22}{180}\right) \times \tan^{-1}(\mathbf{X}) + 0.11 \qquad ekvation 4$$

[°]

där $X = 10(\Phi-1,25)$ uttryckt i grader

En enklare metod, "enkel yieldberäkning", som inte tar hänsyn till temperaturen ges av Karlsson och Quintiere (1997). Metoden bygger på resultat från Beylers försök. Nedan visas resultat från dessa försök, d v s Y_{CO} som funktion av Φ med ekvation 5, 6 och 7 inritade bland plottade värden.



Diagram 10 och 11. Y_{CO} som funktion av Φ -värdet för olika bränslen. Försöken utförda av Beyler. Ekvationerna 5, 6 och 7 är inritade i diagrammen (Gottuk & Roby 1995).

$Y_{CO}=0$	för Φ<0,5	ekvation 5
$Y_{CO} = 0, 3 \times \Phi - 0, 15$	för 0,5< Φ <1,2	ekvation 6
<i>Y_{CO}=0,21</i>	för Φ>1,2	ekvation 7

För att få en bild av hur väl dessa ekvationer för yieldberäkning fungerar vid andra typer av försöksuppställningar än de ovan skapades ett motsvarande diagram för heptanserien, diagram 12. I detta diagram är de CO-yielder som uppmättes vid försöken plottade tillsammans med de funktioner som används för de olika beräkningssätten.



Diagram 12. Uppmätt CO-yield i heptanförsöken tillsammans med de olika funktionerna för yieldberäkning. Intressanta detaljer att notera är att den enkla yieldberäkningen ger 0 ända upp till Φ =0,5, och den relativt stora förskjutningen av tangens yieldberäkning för T>875K jämfört med övriga metoder.

Som synes kan en klar korrelation mellan yield CO och Φ -värde utläsas, dock inom ett ganska stort intervall. Observera att viss produktion av CO förekommer även vid mycket låga Φ -värden.

När det gäller andra ämnen, såsom CO₂ och O₂, visar det sig att även koncentrationen av dessa korrelerar väl med Φ -värdet. För dessa är det dock bättre att använda sig av sättet med den normaliserade yielden Y_n vilket beskrivs ovan av ekvation 2, s 16. Om yielderna normaliseras på detta sätt är det möjligt att beskriva dessa med en kurva som visas i diagrammen nedan. Av diagrammen framkommer det också att koncentrationen av dessa ämnen inte alls är lika bränsleberoende som i fallet med CO.



Diagram 13 och 14. Normaliserade yielder av CO_2 och O_2 som funktion av Φ -värdet. I diagrammen är ekvation 8 och 9 inritade (Gottuk et al. 1992).

$$\begin{split} Y_{CO_{2},n} &= Y_{O_{2},n} = 1 & \text{för } \Phi < 1 & ekvation \ 8 \\ Y_{CO_{2},n} &= Y_{O_{2},n} = \frac{1}{\Phi} & \text{för } \Phi > 1 & ekvation \ 9 \end{split}$$

Ur diagrammet ovan kan man utläsa att om man använder ekvationerna 8 och 9 ovan blir yielderna av CO_2 och O_2 lite för stora. För att korrigera detta föreslår Gottuk att man även lägger in en korrektionsfaktor till ekvation 9. Denna bygger på ett medelvärde som är framtaget från försök med olika bränslen och temperaturer (Gottuk & Roby 1995). Ekvation 9 skulle då bli:

$$Y_{CO_2,n} = Y_{O_2,n} = \frac{B_i}{\Phi}$$
 för $\Phi > 1$ ekvation 10

där
$$B_{CO2} = 0,88 \text{ (T>875 K)}$$
 eller 0,77 (T<875 K)
 $B_{O2} = 0,97 \text{ (T>875 K)}$ eller 0,92 (T<875 K)

På samma sätt kan även andra förbränningsprodukter som H_2O , H_2 och TUHC beräknas. Detta behandlas dock inte vidare här.

När sedan yielden av en förbränningsprodukt är beräknad kan man som tidigare nämnts använda denna för att beräkna vilken koncentration av t ex CO man har i brandgaslagret med hjälp av följande ekvation:

$$X_{i} = \frac{Y_{i} \times \dot{m}_{f} \times M_{mix}}{\left(\dot{m}_{f} + \dot{m}_{a}\right) \times M_{i}}$$
 ekvation 11

där	X_i = volymfraktionen av produkten <i>i</i> i brandgaslagret	$[m^{3}/m^{3}]$
	\dot{m}_f = massflödet bränsle	[kg/s]
	\dot{m}_a = massflödet luft till övre brandgaslagret	[kg/s]
	M_{mix} = molekylvikten för gasblandningen, för luft 28,8	[g/mol]
	M_i = molekylvikten för produkten <i>i</i>	[g/mol]
	Y_i = direkt yield av produkt <i>i</i> (ej normaliserad)	[g/g]

Ovanstående ekvation kan inte användas för beräkning av O_2 -halten utan då får istället följande ekvation användas.

$$X_{o} = \frac{0,21 \times \dot{m}_{a} \times \frac{M_{o2}}{M_{air}} - Y_{o2} \times \dot{m}_{f}}{\left(\dot{m}_{a} + \dot{m}_{f}\right) \times \frac{M_{o2}}{M_{air}}} ekvation 12$$

där
$$X_o$$
 = volymfraktion syre i brandgaslagret M_{air} = molekylvikten för luft (28,8)[g/mol] M_{O2} = molekylvikten för syre (32)[g/mol] Y_{O2} = direkt förbrukningshastighet för O2, från ekv 8 eller 10[g/g]

3 Experimentell data

3.1 Beskrivning av försöken

De data som har använts i rapporten är hämtade från två olika försöksserier. Båda serierna är s k modellskaleförsök, och är försök att återskapa förhållandena i ett brandrum i en lite mindre skala. En försöksserie har utförts av oss själva i vilken vi använt metan som bränsle. Den andra försöksserien är utförd av L-G Bengtsson, LTH Brandteknik, som i sina försök använde heptan som bränsle. Försöksuppställningen till heptanförsöken är den samma som användes under de s k Toxfireförsöken utförda vid LTH Brandteknik i Lund (Andersson et al. 1996). Metanseriens försöksuppställning är inte riktigt identisk med dessa försöken. Bl a användes en annan förbrännningskammare samt att det skiljer lite på vilka mätningar som utfördes vid försöken.

3.1.1 Beskrivning av förbränningskammaren

3.1.1.1 Metanförsöken

Det var denna försöksserie som utfördes av författarna själva. Förbränningsrummet var i detta fall uppbyggt av glasfiberarmerade betongplattor. För att undvika att dessa skadades av för höga temperaturer kläddes rummet invändigt med 50 mm mineralullisolering⁴. För att få de ventilationsförhållanden som önskades justerades höjden och bredden på öppningen med hjälp av mineralullskivorna. Bredden på öppningen varierades mellan 0,08-0,25 m och höjden varierades mellan 0,25-0,50 m. Dessutom varierades även tröskelns höjd i några av försöken så att öppningen i dessa fall kom att sitta lite högre upp. Själva brandrummet hade följande invändiga dimensioner:

- Bredd: 0,70 m
- Djup: 1,10 m
- Höjd: 0,75 m

Inne i kammaren mättes temperaturen med termoelement samt koncentrationen av CO, CO_2 och O_2 via en prob⁵. Över kammaren fanns en huv för att samla upp och analysera brandgaserna som lämnade kammaren så att bl.a. RHR kunde beräknas.

⁴ Av typen Gullfiber Minwool Skiva 9056

⁵ Ett rör som sticks in i kammaren varigenom förbränningsgaser sugs ut och analyseras.



Figur 1. Försöksuppställningen för metanförsöken. Förbränningskammaren i bakgrunden under huven och analysinstrument till höger.

3.1.1.2 Heptanförsöken

Denna försöksserien skiljer sig lite från metanserien med avseende på själva försöksuppställningen, och att fler mätningar utfördes. Förbränningsrummet som användes för dessa försök var uppbyggt av eldfast tegel på insidan klätt med en tunn plåt av rostfritt. Rummets storlek var i stort sett samma som för det som användes i metanförsöken och har följande dimensioner:

- Bredd: 0,75 m
- Djup: 1,10 m
- Höjd: 0,80 m

På ena kortsidan fanns en öppning som var 0,46 m bred. För att få olika ventilationsförhållanden i brandrummet användes även här mineralullskivor som justerades så att önskad storlek på öppningen erhölls. I denna serien varierades bredden mellan 0,05-0,46 m och höjden mellan 0,20-0,66 m.

Inne i förbränningskammaren fanns möjlighet att mäta temperaturer, strålning, massförlust och koncentrationer av CO, CO₂ och O₂ via en prob. Istället för att placera hela förbränningskammaren under en huv användes istället en mindre huv som var monterad på förbränningskammarens framsida, se figur 2 s 25.



Figur 2. Principskiss över försöksuppställning vid heptanförsöken (Andersson et al. 1996).

3.1.2 Mätning av massflöde

3.1.2.1 Metanförsök

Massflödet bestämdes här genom att tuben med metangas placerades på en våg. Massförlusten lästes sedan av manuellt var 15:e sekund och massflödet kunde sedan beräknas som ett medelvärde mellan närliggande mätpunkter.

3.1.2.2 Heptanförsök

Här mättes massavbrinningshastigheten med hjälp av en vågplatta som fanns mitt i brandrummet där bränslebålet placerades. Vågplattan stod i sin tur i förbindelse med en lastcell placerad under brandrummet via en keramiks stång. Denna lösning gjordes för att förhindra termisk påverkan så mycket som möjligt.

3.1.3 Mätning av temperatur

3.1.3.1 Metanförsök

I denna försöksserie fanns det totalt 13 termoelement för att mäta temperaturer inne i brandrummet. Åtta av dessa var placerade i en vertikal rad jämt fördelade från golv till tak och placerade ca 5 cm från ena hörnet av brandrummet.

Dessutom fanns det fem termoelement utplacerade ungefär på mitten av väggarna och taket för att mäta temperaturen på insidan av isoleringen mot själva ugnsväggen. Dessa temperaturer används inte av oss vid någon beräkning.

De termoelement som är av störst intresse i rapporten är de fyra översta av de åtta som är placerade längs hörnet inne i brandrummet. Det är dessa fyra som används vid beräkning av

den s k *mean corner upper temperature*, vilken används för att återge temperaturen för det övre brandgaslagret.



Diagram 15. En typisk temperaturgradient från försöken.

Av diagrammet kan man utläsa att temperaturskillnaderna mellan de olika mätpunkterna i hörnet är relativt små, och därmed att den medeltemperatur som används, *mean corner temperature*, är representativ för att återge en medeltemperatur i övre brandgaslagret. De temperaturer som avviker mest är de som sitter längst ner och således befinner sig i den "kalla" zonen eller i gränsen till den.

3.1.3.2 Heptanförsök

I heptanförsöksserien fanns det totalt 21 termoelement placerade inuti brandrummet. Åtta av dessa var placerade i en vertikal rad jämt fördelade från golv till tak och placerade ca 5 cm från ena hörnet av brandrummet. Tre termoelement var placerade på väggarna och tre var placerade i taket för att mäta yttemperaturer på väggar och i taket. Slutligen fanns sju termoelement placerade vertikalt i öppningen för att mäta gastemperaturen på brandgaserna som lämnar kammaren samt temperaturen på inströmmande luft.

3.1.4 Mätning av brandgaser

Koncentrationer av CO₂, CO, och O₂ inne i kammaren uppmättes i båda försöksserierna med hjälp av en prob som stacks in i kammaren. Brandgasen kyls ner, torkas och filtreras innan den sedan leds in i analysutrustningen. I ett flertal av försöken hamnade CO-koncentrationen över mätinstumentens kalibrerade område (1 vol%), vilket gör att dessa värden måste behandlas med viss försiktighet. Troligtvis är dock inte felet betydande.

I heptanförsöken placerades proben i flertalet försök långt in i kammaren nära ena hörnet. I några enstaka försök placerades den längre ner i mer central position i rummet.

Under metanförsöken placerades den i de flesta försöken ca 20-25 cm från taket, ca 15 cm från ena väggen och ungefär 50 cm in i kammaren från öppningen sett. Att den inte sattes helt i mitten av kammaren berodde på att vi ville undvika att den placerades mitt i flamman. Probens placering ändrades även vid några försök, under i övrigt likartade förhållanden, för att få en uppfattning om hur halterna varierade på olika platser i brandgaslagret. I dessa försök justerades probens placering vertikalt till en position ca 20 cm över golvet, samt i något försök horisontellt till en position ca 10 cm från öppningen. Vid analys av dessa försök visade det sig att CO-koncentrationen var ganska homogen i rummet. Den enda avvikelsen som kunde uttydas var lägre koncentrationer närmast öppningen i försökens inledningsskede.



Figur 3. Probens placering i förbränningskammaren som den var i de flesta försöken. Fotot taget snett underifrån genom öppningen.

3.1.5 Mätning av förbränningsgaser

För beräkning av RHR och yielder⁶ av förbränningsprodukter mm, samlas brandgaserna som lämnar kammaren upp av en huv. Därifrån leds brandgaserna till en avgaskanal där mätningarna utfördes.

Avgaskanalen är konstruerad så att den första delen av avgaskanalen utgörs av en s k stabiliseringssektion för att stabilisera flödet av brandgaserna. Denna del av kanalen är även isolerad för att undvika problem med kondens som annars kan uppstå. Direkt efter denna sektion sitter all mätutrustning för analys av brandgaserna.

De värden som mäts i kanalen är tryck, temperatur, koncentrationer av O₂,CO₂, CO, NO_x^{7,8} och HC⁴ (oförbrända kolväten). Dessa värden används sedan för att betstämma exempelvis RHR och yielder av de olika förbränningsprodukterna.

Nedan visas en schematisk bild över mätutrustningen i avgaskanalen.

⁶ Beräknas endast för heptanförsöken.

⁷ NO_x och HC mättes endast i heptanförsöken.

⁸ Kväveoxidföreningar. Dessa är ej aktuella i vårt fall då bränslet inte innehåller något kväve. De mängder som bildas är ytterst små och är därmed försumbara.



Figur 4. Schematisk bild över mätutrustning i avgaskanalen. Vid metanförsöken användes endast den del som analyserar CO, CO₂ och O₂, tryckmätare samt termoelement (Andersson et al. 1996).

Vid koncentrationsbestämning av O_2 , CO_2 , CO_2 , CO_3 , NO_x och HC samlas gas kontinuerligt upp i kanalen av prober för att filtreras, torkas och värmas eller kylas innan den når analysinstrumenten. De mätvärden som är intressanta för vår del är RHR, yielder och HC-koncentrationen.

Vidare specifikation av mätutrustningen som typ av utrustning, mätområde och noggrannhet hänvisas till (Andersson et al. 1996).

3.2 Begränsningar vid försök

I de båda försöksserierna finns naturligtvis en rad begränsningar.

3.2.1 Heptanserien

I detta försök eldades heptan i ett kärl placerat centralt i rummet i golvnivå. Kärlets storlek varierades mellan 0,20 och 0,30 m i diameter. Heptan är som bekant en vätska som brinner på ett sätt som t ex kan liknas med bensin. Dock ger en sådan brand inte en fullgod bild av en verklig brand. Framför allt är det bränsleytans storlek som begränsas på ett onaturligt sätt. När temperaturen i försöksrummet stiger ökar visserligen återstrålningen till bränsleytan vilket medför att mer bränsle förångas, dock endast upp till en viss gräns. Denna gräns har i försök visat sig ligga på 3-6 gånger den normala förångningen vid poolbrand. Över denna gräns sker ingen ytterligare ökning av mängden tillfört bränsle. I verkligheten finns oftast ingen sådan begränsning då brandens area normalt inte är begränsad. När temperaturen i ett verkligt brandrum stiger kommer bränsle förångas från en allt större yta, för att till sist inkludera alla brännbara ytor i rummet inklusive väggar, tak och inventarier. Med andra ord kommer bränsle tillföras det övre brandgaslagret från flera ställen, och inte som i försöket enbart från kärlet med bränsle.

3.2.2 Metanserien

I denna försökserie användes metangas som bränsle. För att få en så naturlig flamma som möjligt användes en s k sandbrännare med relativt stor brännararea. Detta för att få ner gashastigheten i själva brännaren och därmed oönskad turbulens. Dock lider även metanserien av att återkopplingen inte återspeglas på ett sätt som till fullo liknar en verklig brand. Återkopplingen till bränsleytan saknas i det här fallet helt, bränsleflödet lyder slaviskt vad som ställs in på gaskranen. Detta ger även möjligheter att laborera med olika gasflöden under respektive över vad som kan anses normalt, men det ger inte riktigt en välvisande bild av en normal rumsbrand.

3.3 Beräkning av mätvärden

De mätvärden som loggas till datorn måste sedan bearbetas genom olika former av beräkningar för att kunna användas. Det är framförallt följande värden som har varit av intresse att beräkna fram:

- Massförlust av bränslet
- Temperaturer
- Φ -värdet
- Yielder CO, CO₂
- RHR

3.3.1 Beräkning av massförlust

3.3.1.1 Heptanserien

Massförlusten i heptanförsöken mättes som tidigare nämnts med hjälp av en lastcell som var placerad under ugnen. Bränslebålets massa loggas sedan till en dator och med hjälp av de mätvärden som erhålls kan sedan massförlusten beräknas.

Turbulensen som skapas vid gasflödena in och ut ur rummet medför att mätvärdena på massförlusten varierar ganska mycket. För att motverka dessa fluktuationer beräknas massförlusten som ett medelvärde över en tid på 72 sekunder.



Diagram 16. Jämförelse av massförlusten beräknat via varje mätvärde samt som ett medelvärde över 72 s (heptanförsök 9).



Diagram 17. Bränslebålets massa som en funktion av tiden (heptanförsök 9).

Av ovanstående diagram ser man att massförlusten är ganska konstant vilket medför att man därför kan använda ett medelvärde över en längre tid utan att få alltför stora fel vid en beräkning av massförlusten.

3.3.1.2 Metanserien

I metanförsöken användes en annan konstruktion för att bestämma massförlusten. Metangasen förvaras i en gasflaska som väger drygt 70 kg, men den våg som användes hade ett mätområde som endast sträckte sig till 60 kg. Detta löstes genom en konstruktion där en vikt via en talja i taket avlastade vågen. Denna våg kunde ej heller kopplas till dator varvid mätvärdena fick avläsas manuellt och antecknas var 15:e sekund under försöken. Vågens noggrannhet är ett gram. I vissa försök var gasflödet konstant under hela försöket, men här

lästes vågen av ändå för att ha en koll på flödet. Dessa mätvärden bearbetades sedan i kalkyprogram. Den totala utsläppta gasmängden skrevs in vid respektive tidpunkt som den var avläst. Av dessa räknades sedan gasflödet per sekund (g/s) ut som ett medelvärde över 15 s för varje tidssteg (5 s).

Dessutom beräknades ett medelvärde för hela försöket ut, vilket framförallt är användbart i de försöken där vi hade ett konstant massflöde under hela försöket. Massflödet har framförallt betydelse när Φ -värdet skall beräknas.

Nedan visas exempel på den utsläppta mängden gas för ett typiskt försök, samt ett exempel på när dessa data har omräknats till ett gasflöde i g/s.



Diagram 18. Utsläppt gasmängd för försök metan 9.



Diagram 19. Gasflöde från försök metan 9.

Den variation av gasflödet som kan utläsas av diagrammet ovan är snarare ett resultat av den mänskligare faktorn än en variation i gasflödet. Den kan t ex bero på att det är svårt att läsa av vågen i exakt rätt tidpunkt eller att vågen slår om precis när man läst av eller skall läsa av.

3.3.2 Beräkning av medeltemperatur i övre brandgaslagret

Beräkning av den temperatur som vi använder som referenstemperatur för det övre brandgaslagret beräknas som det omnämns tidigare i kapitel 3.1.3, s 25, enligt nedan:

$$T_g = \frac{\sum_{i=1}^{4} T_i}{4}$$
 ekvation 13

där T_i = temperatur för respektive termoelement, T_1 är det översta. [K] T_g = temperatur i övre brandgaslagret, *mean corner temperature* [K]

Att på detta sätt beräkna den s k mean corner temperature är en generellt vedertagen metod.

3.3.3 Beräkning av ekvivalenskvot (Φ -värde)

Ventilationsförhållandet har bl a stor inverkan på vilka restprodukter som bildas vid en brand. När Φ -värdet för försöken skall beräknas används framförallt temperaturen som uppmätts i brandrummet. Beräkningsgången blir följande:

Ekvivalenskvoten beräknas som tidigare redovisats i kapitel 2.3.1, s 14, men då förhållandena kan antas vara någotsånär stationära används massflöden istället för massa för att beskriva bränsle/luftblandningen:

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_a}{r}$$
ekvation 14
där \dot{m}_f = bränsleflöde [kg/s]
 \dot{m}_a = luftflöde [kg/s]

[kg/kg]

Massförlusten bränsle (\dot{m}_f) erhålls direkt eller genom att den utsläppta mängden gas vägs och bearbetas som tidigare omnämnts.

r =stökiometrisk kvot (bränsleberoende)

Den stökiometriska kvoten *r*, beräknas på samma sätt som visas i kapitel 2.3.1och ger för de båda bränsletyperna som använts vid försöken följande värden på *r*:

Tabell 1.	
Bränsle	r (kg/kg)
Metan (CH ₄)	0,0584
Heptan (C ₇ H ₁₆)	0,0662

För beräkning av massflödet av luft görs ett antagande att all luft som strömmar in i brandrummet i den nedre kalla zonen medverkar i förbränningen av bränslet. Med välkända ekvationer kan man då få ett uttryck för massflödet luft som endast beräknas med hjälp av temperaturen i det övre brandgaslagret och öppningens storlek. Massflödet luft in i den nedre delen av en öppning fås av ekvation 15:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d B \rho_a \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} h^{\frac{3}{2}}$$
 ekvation 15

där	\dot{m}_a = luftflöde in i den nedre delen av öppningen	[kg/s]
	B = öppningens bredd	[m]
	C_d = kontraktionsfaktor för inströmmande gas	[0,68]
	• $a = inströmmande lufts densitet$	$[kg/m^3]$
	• $_g$ = brandgaslagrets densitet	$[kg/m^3]$
	g = tyngdaccelerationen	$[9,81 \text{ m/s}^2]$
	h = höjd från öppningens botten till neutralplanet	[m]

Med antagandet att massflödet in och ut ur brandrummet är lika stora kan sedan ett uttryck för neutralplanets höjd erhållas enligt följande:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{3}}}$$
 ekvation 16

där H =öppningens totala höjd

Kombineras sedan ekvation 15 och 16 samt att öppningsarea A=B×H kan ett uttryck för massflödet av luft in i brandrummet erhållas enligt följande:

$$\dot{m}_{a} = \frac{2}{3}C_{d}A\sqrt{H}\sqrt{2g}\rho_{a} \sqrt{\left[\frac{(\rho_{a} - \rho_{g})/\rho_{a}}{\left[1 + \left(\frac{\rho_{a}}{\rho_{g}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{3}}} \qquad ekvation 17$$

där A =öppningens totala area

Om man dessutom utnyttjar det faktum att densiteterna kan ersättas med temperaturer istället med hjälp av allmänna gaslagen, kan man med lite omskrivning uttrycka ekvation 17 enligt följande:

$$\dot{m}_{a} = \frac{2}{3}C_{d}A\sqrt{H}\sqrt{2g}\frac{353}{T_{a}}\sqrt{\frac{\left(1 - \frac{T_{a}}{T_{g}}\right)}{\left(1 + \left(\frac{T_{g}}{T_{a}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^{3}}}$$

ekvation 18

[m]

 $[m^2]$

där	T_a = inströmmande lufts temperatur	[K]
	T_g = Temperaturen i övre brandgaslagret	[K]

Ekvation 18 är det slutliga uttrycket som används för beräkning av Φ -värdet enligt ekvation 14. Att bestämma Φ -värdet på detta sätt ger en god approximation jämfört med att mäta det exakt med speciell utrustning. I nedanstående diagram kan skillnaden mellan uppmätt och beräknat Φ -värde utläsas.



Diagram 20 och 21. Jämförelse av Φ -värden, uppmätta med speciell Φ -mätare respektive beräknade (Andersson et al. 1996).

Då skillnaden mellan uppmätt och beräknat Φ -värde är i det närmaste försumbara fann vi ingen anledning att använda den relativt krångliga apparaturen (Andersson et al. 1996).

3.3.4 Beräkning av yielder

I denna rapport har yielder främst använts för att beräkna fram ett förhållande mellan CO och CO₂ som i sin tur har använts som indata i CFAST. Den beräkningsgång som har använts för att räkna fram yielderna beskrivs vidare i kapitel 2.3.3, s 18.

3.3.5 Beräkning av RHR

Effektutvecklingen under försöken beräknades enligt den s k syreförbrukningsmetoden (*e.g Oxygen Consumption Method*). Denna bygger på att frigjord energi per massenhet syre som förbrukas vid en förbränning är konstant, ca 13,1 MJ/kg syre som förbrukas (Janssens 1995). Förbränningsgaserna som lämnar rummet samlas upp i en huv och leds bort i en avgaskanal där prover av gasen tas och analyseras. I kanalen mäts följande:

- Gastemperatur
- Skillnad mellan stagnationstryck och statiskt tryck
- Koncentration av CO, CO₂ och O₂

Gastemperaturen och tryckskillnaden används för att beräkna volymflödet i kanalen, vilket är nödvändigt att känna till för att kunna beräkna effektutvecklingen. Hur koncentrationen av förbränningsprodukter mäts beskrivs utförligare i kapitel 3.1.5, s 27.

Volymflödet vid STP beräknas enligt följande:

$$\dot{V} = A \times v$$
ekvation 19där $\dot{V} =$ volymflödet i kanalen $[m^3/s]$ $A =$ kanalens tvärsnittsarea $[m^2]$ $v =$ gashastighet i kanalen $[m/s]$

Gashastigheten bestäms genom att man mäter tryckskillnaden mellan det statiska och dynamiska trycket (Δp) med hjälp av ett pitotrör i kanalen och ges av följande formel:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_g}}$$
 ekvation 20

där•
$$p$$
 = tryckskillnad[Pa]• g = gasernas densitet[kg/m³]

Genom att mäta temperaturen i kanalen kan gasdensiteten (ρ_g) bestämmas. Till detta kommer att volymflödet skall dessutom relateras till STP, och att hänsyn måste tas till att hastighetsprofilen för gasen i kanalen inte är konstant. Detta medför att formeln för volymflödet ser ut enligt följande:

$$\dot{V} = A \times \frac{k_1}{k_2} \times \frac{1}{\rho_{298}} \times \sqrt{\frac{2\Delta \rho T_0 \rho_0}{T_g}} \qquad ekvation 21$$

där	$k_1 =$ kvoten mellan medelvärdet för massflödet per ytenhet	
	och massflödet per ytenhet i utsugningskanalens centrum	[0,9]
	$k_2 =$ kalibreringskonstant för pitotröret	[1,08]
	T_g = gastemperaturen i kanalen	[K]
	ρ_{298} = luftens densitet vid 298 K	[1,185 kg/m ³]
	$T_0 = $ omgivande lufts temperatur	[K]
	• $_0$ = omgivande lufts densitet	[K]

I och med att förhållandet mellan omgivande lufts temperatur och densitet är någorlunda konstant, med förhållande enligt ekvation 22, kan ekvationen för volymflöde förenklas ytterligare.

 $\frac{\sqrt{2T_0\rho_0}}{\rho_{298}} = 22,4$ kvation 22 $\dot{V} = A \times \frac{k_1}{k_2} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{T_g}} \times 22,4$ ekvation 23

Eftersom även CO₂ och CO mättes i kanalen tas det även hänsyn till dessa produkter när effektutvecklingen beräknas. Följande ekvationer används vid beräkningarna:

$$\dot{Q} = \left[E\Phi - (E_{co} - E) \frac{(1 - \Phi)}{2} \frac{X_{co}^{g}}{X_{o2}^{g}} \right] \frac{\dot{V}\rho_{g}}{1 + \Phi(\alpha - 1)} \frac{M_{o2}}{M_{a}} (1 - X_{H_{2}o}) X_{o2}^{0} \quad ekvation \ 24$$

Med:

$$\Phi = \frac{X_{O2}^{0} \left(1 - X_{CO_{2}}^{s} - X_{CO}^{s}\right) - X_{O2}^{s} \left(1 - X_{CO_{2}}^{0}\right)}{\left(1 - X_{O2}^{s} - X_{CO_{2}}^{s} - X_{CO}^{s}\right) X_{O2}^{0}}$$
 ekvation 25

där	E	= energin som utvecklas per massenhet syre förbrukat	[13,1MJ/kg]
	E_{CO}	= energin per massenhet syre förbrukat för oxidation av	
		CO till CO ₂	[17,6MJ/kg]
	X_i^{g}	= uppmätt volymfraktion av ämnet <i>i</i> i avgaskanalen,	
		$i=(CO, CO_2 \text{ och } O_2)$	
	X_i^0	= uppmätt volymfraktion av ämnet <i>i</i> i omgivningen (luften)	[här 20,9% O ₂]
			$[0\% \text{ CO}_2^9]$
	α	= expansionsfaktor för luft som förlorar sitt syre	[här 1,1]
	Ŵ	= volymflödet i kanalen enligt ekv 21	$[m^{3}/s]$
	M_{O2}	= molvikt för syre	[32,0 kg/kmol]
	M_a	= molvikt för luft	[28,9 kg/kmol]
4	$X_{H,O}$	= molfraktion vattenånga i förbränningsluften	[här 0,002]

3.3.6 Beräkning av förbränningseffektivitet

Förbränningseffektiviteten beräknas genom att jämföra den framräknade effektutvecklingen enligt ovan med den teoretiskt högsta grundat på mängden bränsle enligt följande ekvation:

$\chi = \frac{Q}{\dot{m}_f \times \Delta H_c}$	ekvation 26
där \dot{m}_f = massflödet av bränslet	[kg/s]
ΔH_{c} = teoretiska förbränningsvärmet för metan	[här 50 MJ/kg]

 $^{^9}$ En liten mängd CO $_2$ finns i omgivningsluften, ca 330ppm, vilket dock försummas här.
4 Beräkningsmetoder för antändning av brandgaslagret och övertändning

4.1 Beylers ekvation

I det inledande kapitlet om antändning av brandgaslagret, kapitel 2.1 s 11, klargjordes att övertändning och antändning av brandgaslagret är en process där en diffusionsflamma är styrande. Det är dock möjligt att applicera teorierna för brännbarhetsgränser för förblandade gaser även för diffusionsflammor (Simmons & Wolfhard 1957). Nedan beskrivs varför.

Simmons och Wolfhard utförde experiment med diffusionsflammor där de mätte molfraktionen syre i den oxiderande luftströmmen. Vid flammans brännbarhetsgräns erhölls då ett s k *limiting oxygen index*, d v s minsta mängd syre som krävdes för att flamman skulle kunna brinna. Vidare upptäcktes det att detta index gav samma värde som för det stökiometriska fallet med förblandade gaser så länge bränslet var det samma. Molfraktionen syre blev alltså den samma i de bägge fallen. På detta sätt översätts den undre brännbarhetsgränsen för en diffusionsflamma till det traditionella sättet med adiabatisk flamtemperatur för förblandade gaser utan att några betydande fel uppstår.

Att bestämma om ett brandgaslager är brännbart eller inte kan alltså sägas vara en fråga om brännbarhetsgränser. Med andra ord finns det framförallt två variabler som påverkar brandgaslagrets antändbarhet, koncentration av brännbara gaser och temperatur. Ju högre temperaturen är desto större blir brännbarhetsområdet. Ett förslag för bestämning av ett brandgaslagers brännbarhet har presenterats av Beyler (Beyler 1995).

4.1.1 Teori

4.1.1.1 Grunderna för Beylers ekvation

Beylers modell är grundad på Le Chateliers lag, ekvation 27, som utvecklades så tidigt som i slutet av 1800-talet efter empiriska erfarenheter.

$$\sum_{i=1}^{n} \binom{C_i}{SL_i} \ge 1 \qquad ekvation 27$$

där C_i = volymförhållande bränsle *i*/luft [m³/m³] SL_i = volymförhållande bränsle *i*/luft vid stökiometrisk blandning[m³/m³]

Lagen säger att när summan av de olika ingående bränslenas koncentrationskvoter är mer än eller lika med 1 är gasblandningen antändningsbar. Beteckningen *SL* kommer av engelskans *stoichiometric limit*. Om sedan den adiabatiska flamtemperaturen antas vara konstant kan ekvation 27 skrivas om enligt ekvation 28.

$\sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \Delta H_{c,i}}{\int_{T_0}^{T_f, SL_i} n_p C_p dT} \ge 1$	ekvation 28	
	2 2	

där	C_i	= volymförhållande bränsle <i>i</i> /luft vid stökiometrisk blandning	g[m³/m³]
	$\Delta H_{c,i}$	= förbränningsvärme för bränsle <i>i</i>	[kJ/mol]
	$T_{f,SLi}$	= adiabatisk flamtemperatur vid stökiometrisk bränsle/luft-	
		blandning för bränsle <i>i</i>	[K]
	T_o	= initialtemperatur för bränsle/luftblandning	[K]
	n_p	= molförhållande produkter/reaktander vid stökiometri	[mol/mol]
	C_p	= värmekapacivitet	[kJ/mol K]

Med andra ord uttrycks koncentrationerna i stället i form av energi med hjälp av teorin om adiabatisk flamtemperatur. Täljaren beskriver tillgänglig energi i gasblandningen, medan nämnaren beskriver nödvändig energiutveckling för brandens fortlevnad vid stökiometriska förhållanden. Alltså gäller fortfarande att bränsle/luftblandningen är antändningsbar om kvoten är större än eller lika med 1. Denna ekvation är dock svår att tillämpa i praktiken då det krävs en mycket god kännedom om gasblandningens sammansättning för att kunna beräkna antändbarheten. Ett sätt att undgå detta problem är att använda Beylers ekvation som är en vidareutveckling av ekvation 28.

4.1.1.2 Beylers förenkling

Beylers förenkling består i att generalisera ekvation 28 genom att använda begreppet ekvivalenskvot, eller Φ -värdet som vi valt att kalla det i den här rapporten. Φ -värdet har tidigare definierats i kapitel 2.3.1, s 14, och ges av ekvation 14.

$$\Phi = \frac{\dot{m}_{f}}{\dot{m}_{a}r} \qquad ekvation 14$$

$$r = \left(\frac{m_{f}}{m_{a}}\right)_{Stökiometri} \qquad ekvation 29$$

där	\dot{m}_f = massflöde av bränsle	[kg/s]
	\dot{m}_a = massflöde av luft	[kg/s]
	r = massförhållande bränsle/luft vid stökiometrisk blandning	[kg/kg]

 Φ -värdet beskriver hur välventilerad branden är. Om värdet blir mindre än 1 är branden bränslekontrollerad. Det finns alltså luft i överskott jämfört med det stökiometriska fallet. När detta inträffar antas det i Beylers modell att inga brännbara gaser når det övre brandgaslagret, som därmed inte heller kan bli brännbart. När Φ -värdet är större än 1 råder ventilationskontroll, d v s det frigörs mer bränsle än vad det finns syre tillgängligt för att förbränna bränslet fullständigt. I dessa fall kommer således oförbrända gaser ansamlas i övre brandgaslagret i form av framförallt kolväten och kolmonoxid. Blir koncentrationen tillräckligt hög blir brandgaslagret antändbart. Massfraktionen bränsle i brandgaslagret ges av ekvation 30 (Karlsson & Quintiere1997).

$$Y_{f} = \frac{1 - \frac{1}{\Phi}}{1 + \frac{1}{(\Phi r)}}$$
 ekvation 30

där Y_f = massförhållande bränsle/total massa i övre brandgaslagret

För att kunna tillämpa Φ -värdet måste dock ekvation 28 skrivas om så att den blir massbaserad. Genom att ersätta de olika brännbara gaser som normalt bildas vid en underventilerad brand med ett typbränsle kan ekvationen i samma steg även förenklas genom att summatecknet lätt kan beräknas. Denna approximation är godtagbar då de flesta kolväten har liknande fysikaliska data. Om värmekapaciteten dessutom antas vara konstant och ej förändras med temperaturen kan integralen ersättas med konstanta värden. I sin förenklade form lyder ekvation 28 enligt ekvation 31.

$$\frac{Y_f \Delta H_c}{m_p C_p (T_{SL} - T_0)} \ge 1 \qquad ekvation 31$$

där ΔH_c = förbränningsvärme för bränsle [kJ/kg] m_p = produkternas massa vid förbränning av 1 kg brandgaslager [kg]

Även ekvation 31 innebär problem genom att bränslet måste bestämmas på något sätt för att få fram förbränningsvärme och masskvot. Därför används i stället det faktum att utvecklad energi är proportionerlig mot mängden förbrukat syre, ekvation 32. Av samma skäl skrivs också masskvoten m_p om enligt ekvation 33.

$$\Delta H_c = \frac{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}{r} \qquad ekvation 32$$

där ΔH_{O2} = energikonstant grundat på syreförbrukning[13,4 MJ/kg] Y_{O2} = massandel syre i inströmmande luft[kg/kg]r = bränsle/luft-förhållande vid stökiometri[kg/kg]

 $m_p = 1 + \frac{Y_f}{r}$ ekvation 33

Med dessa båda omskrivningar tillsammans med att massfraktionen bränsle i brandgaslagret kan uttryckas enligt ekvation 30 erhålls slutligen Beylers ekvation för bestämning om ett brandgaslager är antändningsbart eller inte, ekvation 34. När uttrycket ger ett värde större än ett är brandgaslagret enligt modellen antändningsbart, medan värden under ett ger att gasblandningen inte ligger i det brännbara området. Som synes tar modellen hänsyn till både koncentrationen oförbrända gaser och initialtemperatur i brandgaslagret.

$\left(\frac{1-\frac{1}{\Phi}}{1+r}\right)\left(\frac{\Delta H_{o_2}Y_{o_2}}{C_p(T_{SL}-T_0)}\right) \ge 1$	ekvation 34
där • = ekvivalenskvot	[kg/kg]
r = massförhållandet bränsle/luft vid stökiometrisk blandning	[kg/kg]
ΔH_{O2} = energikonstant grundat på syreförbrukning	[kJ/kg]
Y_{O2} = massandel syre i inströmmande luft	[kg/kg]
T_{SL} = adiabatisk flamtemperatur	[K]
T_o = initial temperatur för bränsle/luftblandning	[K]

4.1.1.3 Generalisering av Beylers ekvation

Många av de ingående parametrarna i Beylers ekvation kan anses vara mer eller mindre konstanta. De två helt dominerande variablerna blir därför initialtemperaturen, d v s temperaturen i övre brandgaslagret, samt Φ -värdet. Därför kan ekvation 34 med fördel förenklas ytterligare för praktiskt bruk genom att ett samband mellan dessa båda variabler, ekvation 35, tas fram:

$$\Phi \ge \frac{1}{1 - \frac{(1+r)(T_{SL} - T_0)C_p}{\Delta H_{o_2}Y_{o_2}}}$$
 ekvation 35

Om alla variabler utom ekvivalenskvoten och initialtemperaturen sätts till konstanter enligt tabell 2 erhålls en mycket enkel funktion som beskriver lägsta möjliga Φ -värde vid en given temperatur som kan ge ett antändningsbart brandgaslager, ekvation 36.

Tabell 2. Representativa värden för förenkling av Beylers ekvation

Variabel	Värde
r	0,07
T _{SL}	1700 K
Cp	1,1 kJ/kgK
ΔH_{O2}	13,4 MJ/kg
Y _{O2}	0,233

Nedanstående ekvation beskriver alltså sambandet mellan temperatur och Φ -värdet i övre brandgaslagret för villkoret att detsamma ska vara antändningsbart.

$$\Phi \ge \frac{1}{0,359 + 3,77 \cdot 10^{-4} T_0}$$

ekvation 36

Ekvation 36 redovisas grafiskt i diagram 22. I diagrammet är gasblandningen i övre brandgaslagret antändningsbar när det befinner sig ovanför funktionen.



Diagram 22. Ekvivalenskvot vid antändning som funktion av brandgaslagrets temperatur.

4.1.1.4 Begränsningar för Beylers ekvation

Genom att studera Beylers ekvation, ekvation 35, kan genast en begränsning utläsas. Ekvivalenskvoten måste vara större än ett för att uttrycket ska kunna bli positivt. Detta var ju också en av förutsättningarna i härledandet av ekvationen, att vid ekvivalenskvoter mindre än ett anses inga oförbrända gaser nå brandgaslagret. En annan begränsning är att ekvationen är bränsleberoende. För normala kolväten kan standardvärdena i tabell 2 användas utan att allt för stora fel uppstår. För andra bränslen som t ex kolmonoxid och väte kommer både den stökiometriska masskvoten r och den adiabatiska flamtemperaturen T_{SL} anta helt andra värden. Även grundkonceptet med konstanta värden för värmekapacitet och förbränningsvärmeger en begränsning då bränslen med avvikande fysikaliska data används. Modellen tar heller inte hänsyn till den övre brännbarhetsgränsen.

4.1.2 Jämförelse beräkning/experiment

För att utreda hur bra Beylers ekvation fungerar i praktiken jämfördes den med de experiment som redovisas i kapitel 3.1, s 23. I försöken mättes ett stort antal parametrar varav endast vissa är intressanta vid beräkning av Beylers ekvation. De mätvärden som använts är ekvivalenskvoten • och temperaturen i brandgaslagret T_0 . Ekvivalenskvoten är ett beräknat värde grundat på en mängd parametrar, se kapitel 2.3.1, s 14, medan temperaturen i brandgaslagret erhålls av den s k *mean corner temperature*, d v s ett medelvärde av fyra termoelements värden. T_0 är alltså temperaturen i brandgaslagret och inte någon rumstemperatur kring 20°C eller liknande. Dessa två variabler, T_0 och • , är de enda som tillåts variera under brandförloppet i beräkningen av Beylers ekvation.

Bränslet som användes vid försöken var som bekant heptan och metan, vilket bestämmer den adiabatiska flamtemperaturen T_{SL} till ca 1700 K då det kan antas att huvuddelen av de oförbrända gaser som kan tänkas nå brandgaslagret består av kolväten. Kännedom om bränslet möjliggjorde även att det stökiometriska massförhållandet *r* kunde beräknas till 0,066 respektive 0,058 kg/kg. I övrigt användes de konstanter som föreslås i kapitel 4.1.1.3. Med dessa indata beräknades Beylers ekvation, ekvation 35, för var fjärde sekund under hela brandförloppet. En sammanställning över använda indata redovisas i tabell 3.

	Värde	Anmärkning
•	Från mätresultat	Varieras under förloppet
T ₀	Från mätresultat K	Varieras under förloppet
r _{heptan}	0,066 kg/kg	Konstant
r _{metan}	0,058 kg/kg	Konstant
T _{SL}	1700 K	Konstant
Cp	1,1 kJ/kgK	Konstant
ΔH_{O2}	13,4 MJ/kg	Konstant
Y _{O2}	0,233 kg/kg	Konstant

Tabell 3.Sammanställning av indata vid beräkning av Beylers ekvation

Som tidigare nämnts är Beylers ekvation endast giltig när • -värdet är större än 1. Detta ger att framförallt i heptanserien stryks en mängd mätvärden då försöken var bränslekontrollerade i hela eller delar av förloppet.



Diagram 23. Exempel på beräknade värden av Beylers ekvation tillsammans med motsvarande ekvivalenskvoter •. Utjämnad i förklaringstexten för kurvorna innebär att kurvorna representerar ett medelvärde över 72 s. Diagrammet hämtat från heptanförsök 10.

I diagram 23 som redovisar försök 10 i heptanserien ges ett exempel på hur Beylers ekvation och ekvivalenskvoten varierar under förloppet. I det här fallet är Beylers funktion giltig nästan i hela förloppet, d v s ekvivalenskvoten är större än 1 under hela försöket förutom de första 25 sekunderna. Alltså kan Beylers ekvation användas för att bestämma om brandgaslagret är antändningsbart eller inte i detta försök. I heptanförsök 10, ovan, skulle brandgaslagret vara antändbart efter ca 600 s enligt Beylers ekvation. Även vid ca 240 s går funktionen väldigt nära 1 vilket skulle kunna innebära att risk för antändning av brandgaslagret finns även vid denna tidpunkt.

4.1.2.1 Jämförelse med det visuella intrycket

Beräkningarna av Beylers ekvation enligt föregående kapitel jämfördes sedan med de visuella intryck som uppfattades vid försöken. D v s genom att studera försöken, både under försökens gång och med hjälp av video, avgjordes i vilka av dessa som brandgaslagret antändes och i så fall när. Att avgöra om brandgaslagret brinner eller inte kan tyckas vara en mycket enkel uppgift, men i praktiken visade det sig att det var svårt att dra en skarp skiljelinje mellan ett brinnande brandgaslager och lågor som egentligen kunde anses komma från brännaren. Att t ex använda lågor ut genom öppningen som indikation på brinnande brandgaslager hade inte gett en rättvisande bild. I många fall gav ventilationsförhållandena att lågorna från brännaren trycktes ut genom öppningen utan att egentligen påverka brandgaslagret. De flesta metanförsöken följde det mönster som redovisas i figur 5.



Figur 5. Principiell beskrivning av brandförlopp i försök:

- A. I försökets inledningsskede brinner gasen från brännaren relativt oförhindrat av väggar och tak. Flammorna begränsas till ytan ovanför brännaren. Brandgaslagret sjunker ganska snabbt till en nivå där en form av jämvikt uppnås mellan in- och utgående flöden.
- B. Temperaturen i brandrummet fortsätter att stiga samtidigt som brandgaslagret sjunker sakta. Efter i storleksordningen en till två minuter efter att försökets startats slår de första flammorna ut genom öppningen. I de flesta försöken börjar flammorna slå ut genom öppningen med långsamma pulsationer för att sedan vara synliga konstant utanför själva brandrummet. Flammorna slår upp genom brandgaslagret, men det rör sig fortfarande endast om flammor som har sitt ursprung i brännaren. I de försök där ekvivalenskvoten är begränsad till strax över 1 blir detta stadium det slutgiltiga.
- C. I de försök där mer bränsle trycks in genom brännaren, d v s ekvivalenskvoten ökas, når branden ytterligare ett stadium. Brandgaslagret sjunker ytterligare för att stabilisera sig så lågt som någon decimeter över golvet. Det har samtidigt blivit tätare och tillåter inte längre några flammor att slå upp genom det. Flammorna trycks istället ned och fyller hela gränsskiktet mot övre brandgaslagret. I vissa försök kom flammorna t o m att ligga under brännarens kant. Det är i detta skede det är svårt att avgöra om brandgaslagret är brännbart eller inte. Är det brandgaslagrets underkant som brinner eller är det helt enkelt så att flammorna från brännaren trycks ned p g a syrefattig miljö över brännaren? I ett fåtal försök ges en tydligare bild av ett brinnande brandgaslager. Intressant att notera är att i samtliga försök består tvåzonsmodellen genom hela förloppet, även då brandgaslagret antänts och med temperaturer på uppemot 900°C i brandrummet.

Svårigheten att avgöra om brandgaslagret brann eller inte gjorde att ett antal försök bedömdes som tveksamma. För att åskådliggöra resultaten av våra iakttagelser plottades utfallet, d v s om brandgaslagret brann eller inte, i ett digram med ekvivalenskvoten som funktion av temperaturen tillsammans med Beylers funktion, diagram 24. Ett värde ovanför Beylers funktion i diagrammet motsvarar att Beylers ekvation ger ett värde större än ett och därmed ett brännbart brandgaslager.



Diagram 24. Utfall av metanförsöken i avseende på om brandgaslagret var brännbart eller ej.

Som synes är inte Beylers funktion helt obefogad. Det är utan tvekan i funktionens närhet som brandgaslagret går från ej brännbart till brännbart. Dock kan det diskuteras om det är riktigt att ha en enkel funktion som skiljelinje mellan det brännbara och icke brännbara området. Enligt vår uppfattning rör det sig snarare om ett intervall som t ex skulle kunna motsvaras av det skuggade partiet i diagram 24. Avvikelser från Beylers ekvation upplevdes framför allt vid höga temperaturer då vi i ett antal försök ansåg att brandgaslagret brann utan att Beylers ekvation gav värden större än 1. Vid lägre temperaturer var upplevelsen den motsatta. Försök som av oss bedömdes som tveksamma huruvida brandgaslagret var brännbart eller ej skulle enligt Beylers ekvation vara klart brännbara.

4.1.2.2 Förändring av temperaturprofilen vid antändning

En annan intressant iakttagelse med avseende på temperaturens utveckling gjordes i de försök där brandgaslagret antändes. Som bekant användes ett träd med åtta termoelemnet placerade med jämna vertikala avstånd för att bl a beräkna den s k *mean corner temperature*. Vid vidare studier av temperaturutvecklingen på olika höjder i rummet, d v s de olika termoelementens temperaturkurvor, kunde ett samband mellan dessa kurvors inbördes förhållande och brandgaslagrets brännbarhet uttydas. I de fall när ingen antändning av brandgaslagret skedde var temperaturkurvorna tydligt uppdelade efter placering i rummet. De termoelement som var placerade högst upp i rummet uppmätte de högsta temperaturerna medan de lägre gav lägre temperaturer. Ett exempel på detta ges i diagram 25.



Diagram 25. Exempel på temperaturdiagram när brandgaslagret ej antänds hämtat från metanförsök 2. Lägg märke till att kurvorna i stort sett aldrig korsar varandra under förloppet, d v s vi har en jämn temperaturprofil med högst temperatur längst upp i rummet och lägst nere vid golvet.

I de fall där brandgaslagret antändes uppstod ett annorlunda förhållande mellan temperaturkurvorna. I samband med att brandgaslagret antänds bryts ordningen med att de högsta temperaturerna återfinns längst upp i rummet. I antändningens inledningsskede ökar temperaturen kraftigt i regionen kring termoelement 2 och 3 från golvet räknat (benämns med 6 resp 7 i diagrammen). Efter detta stadium följer en svårtydd temperaturprofil där inbördes ordning mellan temperaturkurvorna är svår att utläsa. Dock med en något högre temperatur i den lägre regionen. Detta kan tolkas som att antändningen av brandgaslagret börjar på dess undersida i gränsskiktet mot den undre kalla zonen, för att sedan följas av ett mer turbulent förlopp. Ett typexempel på hur temperaturdiagrammet kan se ut när brandgaslagret antänds ges av diagram 26.



Diagram 26. Exempel på temperaturdiagram för ett försök där brandgaslagret antändes, hämtat från metanförsök 10. Lägg märke till hur temperaturen i termoelement 6 och 7, nära golvet, utvecklar sig i förhållande till övriga kurvor. Vid ca 120 s antänds brandgaslagret och temperaturen i dessa båda termolelement stiger kraftigt och ger i resterande delen av försöket de högsta temperaturerna.

4.1.2.3 Slutsats

Våra försök visade att Beylers ekvation på ett bra sätt förutspådde om brandgaslagret skulle bli brännbart eller inte, vilket i förlängningen kan användas för att bestämma om risk för övertändning föreligger då dessa begrepp är tätt sammankopplade. Dock vill vi reservera oss för att sätta en skarp skiljelinje mellan brännbart och icke brännbart. Gränsen mellan dessa områden utgörs snarare av ett intervall än en skarp skiljelinje. Till detta kommer att det i försöken visade sig vara svårt att avgöra exakt när brandgaslagret antändes. Vid val av indata till ekvationen måste framförallt • -värdet ägnas intresse då det är denna parameter som har störst betydelse för resultatet. • -värdet kan antingen antas, eller också kan t ex CFAST användas med goda resultat som följd, se kapitel 4.3.2.4, s 57. En mindre variation av uppskattad temperatur får endast begränsad effekt på resultatet.

4.2 Flashover A1

En annan metod för att beräkna om risk för övertändning föreligger är datorprogrammet Flashover A1. Modellen som presenterades 1994 är resultatet av ett samarbete mellan Alan Beard, Dougal Drysdale, Paul Holborn och Steven Bishop. Programmet kan användas för att bedöma om risk för övertändning finns i ett givet rum med en viss brand. Programmet är skrivet för QuickBasic och består av ett huvudprogram som i sin tur anropar ett antal underprogram, s k *subs* (Beard et al. 1994).



Figur 6. Skärmdump från Flashover A1 visande en del av de underprogram, subs, som används i programmet.

4.2.1 Teori

Modellen bygger på en klassisk tvåzonsmodell med en varm övre zon och en kall undre. Brandrummet karakteriseras av rummets längd, rummets bredd, rummets höjd, samt en öppning från golvnivå och uppåt för vilken höjd och bredd kan specificeras. I detta rum placeras en cirkelformad brand med en given tillväxthastighet som anges i ökning av radie per tidsenhet. När simuleringen påbörjas itererar datormodellen fram resultat för lösning av massoch energibalansekvationer. Modellen tar hänsyn till fenomen som återstrålning från det varma brandgaslagret, insugning av luft i plymen, massflöden in och ut genom öppningen mm. Bränslet kan definieras i avseende på förångningsvärme och förbränningsvärme.

Resultatet av simuleringen återges i form av tre kritiska faktorer som tillsammans bestämmer om risk för övertändning finns. Den första av dessa faktorer är brandgaslagrets temperatur som anses vara konstant i hela den övre heta zonen. Den andra är brandens radie, d v s hur stor branden är till omfånget. Till dessa båda parametrar kommer brandgaslagrets tjocklek, med andra ord sträckan från brandgaslagrets undre kant till taket.



Figur 7. Skärmdump från resultatet av en simulering med Flashover A1 hämtat från exempelfilen som följer med programmet. Till höger syns diagram över de tre kritiska faktorerna (T; temperatur i brandgaslagret, Z; brandgaslagrets tjocklek, R; brandens radie) och under dessa ett diagram för det s k egenvärdet (Eig). I det aktuella fallet skulle övertändning alltså ske efter ca 80 s när Eig går från negativt till positivt värde (hela diagrammet motsvarar 120 s).

Med hjälp av dessa tre faktorer som i modellen beräknas med hjälp av differentialekvationer beräknas ett s k egenvärde (i modellen benämnt *eigenvalue*, •), som är en storhet som beskriver brandens instabilitet. Det absoluta värdet av egenvärdet saknar betydelse, istället är det när värdet för egenvärdet går från att vara negativt till att vara positivt som är av intresse. Det är just i detta ögonblick som branden anses vara så instabil att risk för övertändning uppstår. Följaktligen kommer modellen endast ge relevanta svar fram till dess att övertändning inträffat. Rent matematiskt härstammar egenvärdet från lösningen till ovan nämnda differentialekvationerna beskrivande temperatur, radie och tjocklek, resulterande i ett komplext tal. Det är alltså när realdelen av detta tal blir positivt som systemet anses vara instabilt och risk för övertändning föreligger.

4.2.2 Synpunkter

4.2.2.1 Användarvänlighet

Programmet är som tidigare nämnts skrivet för programmeringsspråket QuickBasic. Detta något föråldrade språk i kombination med bristande vilja/kunskap/möjlighet att göra programmet lätthanterligt gör att Flashover A1 är sällsynt svårt att arbeta med. Som exempel kan nämnas att det finns ingen möjlighet att skapa en indatafil till programmet. Istället får man spara hela programmet varje gång någon parameter ändrats. Det går inte heller att spara resultatet av en simulering i andra former än en s k skärmdump. Detta ställer till problem om man exempelvis skulle vilja analysera data från programmet i ett kalkylprogram. Båda dessa problem skulle sannolikt gå att rätta till med måttliga programmeringskunskaper, något som dock inte anses vara inom målsättningen för den här rapporten. Att ge indata till programmet är i sig ett ganska omfattande arbete. För det första är de parametrar som ska ändras utspridda i ett antal *subs* vilket gör att det är mycket lätt att missa någon parameter. Det visade sig ganska snart också att det inte enbart räckte med att korrigera rummets geometri, öppning och brandstorlek för att få relevanta beräkningar, och ett flertal av de parametrar som man ombeds att justera är mer eller mindre svårförståeliga. Ett exempel på detta ges i figur 8.

Ms Microsoft QuickBasic Extended	- 🗆 ×
File Edit View Search Run Debug Calls Utility Options	Help
Conex = 3! 'Used in SUB for Me Usual value 3	 [
'*************************************	****
KexL = 1.3'** Extinction Coefficient of LayerLenC = 4!'** Length of Compartment (m) [L1]WidC = 4!'** Width of Compartment (m) [L2]KexF = 1.3'** Extinction Coefficient of Fire (m^-1)ThermCond = .0001154#'** Thermal conductivity of upper surface mater'ThermCond = .00069'** Brick'Thermcond = .0011'** Concrete	⁺ial
Thick = .0254 '** Physical thickness of upper surface boundaries (n '** Thickness of Marinite board in Fac Mut tests=.02 'Thick = .06 '** Typical brick (approx-check) 'Thick = .146 '** Tomorrows World average thickness(garage,Nov 1994	1) 254 4)
2 Immediate	
<shift+f1=help> <f6=window> <f2=subs> <f5=run> <f8=step> N 000</f8=step></f5=run></f2=subs></f6=window></shift+f1=help>	020:001

Figur 8. Skärmdump från sub "parameters". Det är i sådana här subs indata defineras genom att siffrorna byts ut till aktuella värden. Lägg märke till mer eller mindre okända faktorer som Conex och KexL.

Till dessa problem kommer att modellen i vissa fall har en tendens att hänga sig, förmodligen beroende på den algoritm som löser differentielekvationerna. Trots en någorlunda snabb dator, PC pentium 200, blev simuleringstiderna i vissa fall uppemot 15 min långa vilket är ganska mycket med tanke på att det endast går att simulera ett enda rum. I några fall låste sig programmet helt, framförallt i fall där ventilationskontroll uppstod.

4.2.2.2 Beräkningarnas relevans

I skrivande stund har uppskattningsvis ett hundratal försök gjorts för att simulera en brand motsvarande de försök som gjordes till rapporten. I ett fåtal fall har resultaten varit något så när rimliga. Framförallt ökar temperaturen på ett orimligt snabbt sätt i de flesta försök, en simulering av heptanförsök 3 gav en temperaturstegring från 20 till 900°C på ca 7 s. En övertändning skulle enligt modellen vara förestående när brandens radie var 0,15 m och brandgaslagrets djup ca 0,3 m, något som inte på något sätt överensstämde med varken uppmätta värden eller visuellt synintryck vid försöken.



Diagram 27. Temperaturkurva [K] från simulering av heptanförsök 3 med Flashover A1. Diagrammets hela längd motsvarar 120 s. Observera den mycket snabba temperaturstegringen i försökets början.

För att utreda om detta kunde bero på någon olycklig omständighet i det aktuella fallet beräknades ett antal scenarion med både Flashover A1 och CFAST. Både olika geometrier och olika bränslen testades. I samtliga fall gav Flashover A1 betydligt högre temperaturer än CFAST, och framförallt gick temperaturstegringen betydligt fortare. I större rum, mer än ca 50 m³ rumsvolym var skillnaderna mindre, men tendenserna var fortfarande de samma. Det visade sig också att resultaten blev betydligt mer trovärdiga med mer långsamma bränslen med hög förångningsvärme och låg förbränningsvärme. Dock inte mer än att samtliga fall fortfarande gav orimligt höga temperaturer.

Undersökningen om vad det var som gjorde att simuleringarna gav orimliga svar fortsatte. Bl a kontaktades Alan Beard, en av programförfattarna, för att få råd om hur programmet skulle användas. Av honom erhölls tipset att gå in och ändra i själva programmet för att korrigera ej önskvärda resultat. I detta läge var QuickBasic-språket en fördel då det ger möjlighet att utan alltför stora problem följa och ändra i av programmet använda ekvationer. Tyvärr visade det sig vara en orimlig uppgift att justera programmet så att en allmängiltig modell kvarstod. Det stora antalet parametrar gav alltför många kombinationer att pröva. Dock kan en rad värden i programmet ifrågasättas vid en genomgång av programmet, bl a följande:

- Bränsleytans emissivitet är satt till 1, vilket innebär att all inkommande strålning kommer att ge energi till förångning av bränslet. Försök har dock visat att hög emissivitet kan uppstå så en korrigering av denna faktor kan inte komma få alltför stor effekt.
- Både synfaktorn från taket till bränsleytan och från brandgaslagret till bränsleytan är satta till 0,95. Detta är i våra ögon orimligt höga värden, i synnerhet i början av en rumsbrand kommer dessa båda parametrar vara betydligt lägre.

4.2.3 Slutsats

Flashover A1 lämpar sig inte som ett ingenjörsverktyg. Att ha en datormodell som måste programmeras om för varje unik situation ger både alltför stora beräkningsosäkerheter och mycket jobb. Även själva programmets uppbyggnad med avsaknad av funktioner för att skapa in- och utdatafiler gör programmet mer eller mindre obrukbart. Man bör dock komma ihåg att modellen vid framtagandet aldrig var avsedd för ingenjörsmässigt användande.

4.3 CFAST

En del av detta projektarbete är att utvärdera datorprogrammet CFAST på främst två olika områden. För det första är det av intresse att se om man kan använda utdata från en simulering som indata till Beylers ekvation och sedan jämföra dessa resultat med försöken. Idén att använda temperaturer från CFAST direkt för att bedöma när övertändning i ett rum sker, t ex när temperaturen överstiger 500°C, fick snabbt överges efter en kort analys av våra försök som visade att denna temperatur varierade inom ett ganska stort område. Nästa område är att utvärdera de resultat som CFAST ger vid beräkningar av förbränningsprodukter och då är det främst CO-halten som anses vara av störst intresse.

4.3.1 Beskrivning av Hazardpaketet

Hazardpaketet är en datormodell utvecklat vid National Institute of Standard and Technology (NIST) i USA, och består av ett antal delprogram. Av dessa program är CEdit, CFAST, och CPlot aktuella här. CFAST är själva beräkningsprogrammet, CEdit är ett editeringsprogram som används för att skapa en indatafil till CFAST, och slutligen är CPlot som ett program som omvandlar utdatan från CFAST till datafiler, diagram mm. I denna rapport har Hazard I version 1.2 använts inkluderande CFAST 2.0 (Peacock et al. 1994).

4.3.1.1 CFAST

CFAST är en så kallad tvåzonsmodell vilken bygger på att varje rum är uppdelat i två kontrollvolymer, ett kallt nedre lager och ett övre varmt som innehåller förbränningsprodukterna. Modellen gör antagandet att hela kontrollvolymen har en och samma temperatur, gaskoncentration o s v i respektive lager. Programmet löser sedan massoch energibalansekvationer mellan de olika kontrollvolymerna och för varje tidssteg genom iteration. Upp till 15 rum med öppningar sinsemellan kan simuleras i programmet.

4.3.1.2 CEdit

I CEdit anger man all data som är relevant för sin simulering. Dessa är:

- Omgivningsförhållanden
- Rumsgeometrier
- Öppningar, såväl dörrar, fönster som taköppningar
- Eventuella fläktar
- Termiska egenskaper för väggar, golv och tak
- Brandförhållanden som effekt, massflöden, förbränningsvärme och förhållanden mellan förbränningsprodukter.

Det enda som behandlas vidare här är "Fire Specification", dvs den delsidan i CEdit som behandlar brandförhållandena. De parametrar som är viktiga för denna rapport är de sista på denna sidan, d v s de parametrar som styr beräkningarna av gaskoncentrationer. Detta är uppdelat i två steg. I det första beskriver man bränslets molekylära sammansättning i former av massbalanser mellan kol, syre och väte. Även förbränningsvärmet för bränslet skall definieras. I steg två definieras massförhållandet mellan förbränningsprodukterna CO, CO₂ och sot. För att kunna få fram relevanta resultat i avseende på gaskoncentrationer krävs det att dessa värden väljs med stor omsorg, både när det gäller bränslets sammansättning och förhållandet mellan förbränningsprodukterna.

Hur övriga villkor definieras i indatafilen antas vara kända för läsaren. I annat fall refereras till användarmanualen (Peacock et al. 1994).

Nedan beskrivs några av de parametrar på denna sida som påverkar resultatet för förbränningsprodukterna.

- H/C: Anger massförhållandet mellan väte- och kolatomer i bränslet, vilket för exempelvis metan, CH₄, blir: $\frac{4 \times 1 \text{ g/mol}}{12 \text{ g/mol}} = 0,333$
- O₂: Anger massförhållandet mellan syre- och kolatomer i bränslet.
- CO/CO₂: Anger förhållandet mellan produktionen av CO och CO₂ i förbränningsprodukterna.
- C/CO₂: Anger förhållandet mellan produktionen av C och CO₂ i förbränningsprodukterna. Då det antas att det är kolet som blir till sot används denna främst till att beräkna siktförhållanden.
- HCN: Anger massförhållandet mellan vätecyanid och kol i bränslet, ej använt i den här rapporten.
- HCL: Anger massförhållandet mellan väteklorid och kol i bränslet, ej använt i den här rapporten.



Figur 9. Skärmdump från CEdit "Fire Specification"

4.3.2 Utvärdering av beräkningar

En del av detta projekt är som tidigare nämnts att jämföra försöken med simuleringar i CFAST. Detta för att försöka utvärdera dels om man kan använda utdata från CFAST till indata i Beylers ekvation, samt dels utvärdera vad CFAST ger för resultat vid beräkningar av förbränningsprodukter som exempelvis CO och CO₂.

Tidigare undersökningar har visat att CFAST har en tendens att ge för höga temperaturer i brandgaslagret vid simulering. Som exempel kan det nämnas att Lundin i sin rapport *Uncertainty in smoke transport models* kommer fram till att i de scenarier som analyseras i rapporten, överpredikteras temperaturen i brandgaslagret i runda tal med 25-40% och att brandgaslagrets höjd underpredikteras med mellan 10-40% (Lundin 1997). En intressant fråga är därför hur väl resultatet från CFAST överstämmer med verkligheten när modellen används för att bestämma Φ -värdet och halterna av förbränningsprodukter i brandgaslagret.

4.3.2.1 Val av representativa värden

Då de båda försöksserierna tillsammans innehåller 39 försök är mängden data som ska analyseras relativt omfattande. För att kunna jämföra försöken sinsemellan och därmed kunna uttyda tendenser valdes ett antal representativa mätpunkter ut. Istället för att redovisa hela försöket med t ex ett traditionellt tid-temperaturdiagram redovisas istället enbart värden för en eller ett fåtal punkter per försök. Dessa valdes ut för att på ett så gott sätt som möjligt representera hela försöket. Därför har t ex inga mätvärden från försökens första minut tagits med då osäkerheten är för stor innan förloppet hunnit stabilisera sig. Även värden i samband med att gasflödet ändrats har undvikits. Med andra ord härstammar de värden som presenteras från relativt stabila förhållanden. Vid tydliga tendenser, som t ex en markant förhöjd CO-halt i början av försöket, har värden valts både från detta stadium och senare under försöket. I de fall där gasflödet ändrats under försökets gång har värden hämtas från tidpunkter strax innan att gasflödet höjdes.

4.3.2.2 Temperatur

Temperaturen ingår som en av parametrarna i Beylers ekvation, ekvation 34, vilken visas nedan.

$$\left(\frac{1-\frac{1}{\Phi}}{1+r}\right)\left(\frac{\Delta H_{o_2}Y_{o_2}}{C_p(T_{SL}-T_0)}\right) \ge 1 \qquad ekvation 34$$

Den temperatur som räknas fram vid en simulering i CFAST är T_0 . Som nämnts tidigare överpredikteras temperaturen vanligtvis av CFAST, vilket medför att värdet av Beylers ekvation även det blir för stort. Man kan givetvis inte säga exakt hur mycket CFAST överpredikterar temperaturen utan det är olika för olika scenarios. Det är däremot intressant att se om detta övervärde som programmet ger ligger inom ett ungefärligt intervall. Med vetskap om detta kan man sedan lättare tolka de resultat som ekvationen ger.

Samtliga temperaturer såväl uppmätta som beräknade av CFAST visas i bilaga A. Ett sätt att få fram hur stor avvikelsen är mellan den uppmätta temperaturen och den beräknade är att kontrollera förhållandena mellan dessa temperaturer. Det vill säga:

$\frac{T_{CFAST} - T_{f\"ors\"ok}}{T_{f\"ors\"ok}}$	ekvation 37
där T_{CFAST} = den av CFAST beräknade temperaturen	[K]

[K]

Nedan visas hur förhållandena mellan dessa temperaturer är metanserien.

 $T_{f \ddot{o} r s \ddot{o} k}$ = den vid försöken uppmätta temperaturen



Diagram 28. Resutatatet av ekvation 37 för metanserien. Temperaturerna som ligger till grund för beräkningarna är uttryckta i K.

De värden som är plottade i diagrammet är typiska värden för försöken. Av diagrammet kan man snabbt utläsa att en simulering med CFAST ger en temperatur som ligger i storleksordningen 20-35% högre än den uppmätta temperaturen, frånsett något enstaka värde. I medeltal överpredikterades temperaturen med 26% eller 245 K i metanserien. I heptanserien gavs något bättre värden. Medlet blev här 19% eller 124 K mer än det verkliga värdet. Dessa intervall är mycket lika det Lundin kom fram till (Lundin 1997).

4.3.2.3 Ekvivalenskvot (Φ -värde)

När det gäller att bestämma Φ -värdet, även kallat ekvivalenskvot, så bestäms detta som bekant genom ekvation 14 nedan.

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_a}{r} \qquad ekvation \ 14$$

Av dessa variabler kan massflödet av bränsle (m_f) och massflödet av luft in i rummet (m_a) erhållas från CFAST. I CPlot kallas dessa värden *pyrolysis* (m_f) samt *ventflow* (m_a) . Från CPlot har dessa värden sedan exporterats till Excel för beräknats enligt ekvation 14.

Vid beräkningar i CFAST kan man antingen välja att definiera effektutvecklingen genom att mata in en effektkurva eller genom att definiera pyrolyshastigheten (*m_f*). Programmet räknar själv ut pyrolyshastigheten eller effektutvecklingen beroende på vad det är man har definierat. Vid simulering av försöken har vi främst valt att definiera pyrolyshastigheten då vi anser att detta värde är bäst uppmätt. Effektutvecklingen (RHR) är också uppmätt, men vissa osäkerheter i detta värdet finns t ex då ventilationskontroll inträffar. Detta beror på att de parametrar som används för att beräkna RHR, främst O₂-halten, mäts i kanalen utanför själva brandrummet, och då ventilationskontroll inträffar sker viss förbränning utanför själva brandrummet. Detta medverkar till att det uppmätta värdet på RHR i några försök blir högre än den verkliga effekten i själva brandrummet. För jämförelsens skull har CFAST även körts med RHR som ingångsvärde. Detta är främst intressant i de försök där huvuddelen av förbränningen sker inne i brandrummet. Då pyrolyshastigheten anges som indata är det främst

hur väl CFAST beräknar massflödet av luft in i rummet som kommer att påverka resultatets riktighet.

Samtliga Φ -värden, såväl uppmätta som beräknade av CFAST, visas i bilaga B. Nedan visas hur de olika Φ -värdena ser ut för ett typiskt försök:



Diagram 29. Jämförelse mellan Φ -värde beräknat m h a CFAST och mätvärden från försök. Det aktuella diagrammet är hämtat från heptanförsök 10.

Vid en snabb blick på diagrammet ovan kan man se att CFAST ger ett ganska rättvisande Φ -värde. I genomsnitt blev felets storlek 13% i metanserien i avseende på värde beräknat med CFAST i förhållande till verkligt värde. Som mest blev felet 30%. Sett som ett totalt genomsnitt gav CFAST ett värde ca 10% större än det verkliga värdet. För heptanserien blev beräkningsresultaten från CFAST ännu mer rättvisande. Felets storlek blev i genomsnitt endast 6%, som mest 20%. Det totala genomsnittet avvek med mindre än 1% från det verkliga värdet.

Det bör påpekas att det som egentligen jämförs i diagram 29 är hur väl CFAST beräknar \dot{m}_a i förhållande till den handberäkning av luftflödet som används för att bestämma det experimentella Φ -värdet. Bränsleflödet \dot{m}_f definieras ju i bägge fallen och utgörs alltså av samma värde.



Diagram 30. Det relativa felet vid beräkningar av Φ -värdet med CFAST. Dessa värden kommer från metanförsöksserien. Det stora felet i metanförsök 5 kan förklaras med att det i detta försök råder mycket låga Φ -värden vilket gör att det relativa felet lätt blir betydande.

Att Φ -värdet generellt blir något större vid simulering med CFAST än det verkliga värdet kan förklaras med att även temperaturen generellt överpredikteras med CFAST. Detta blir särskilt tydligt om man analyserar den funktion som används för att beräkna massflödet genom öppningen, se ekvation 18, s 33. Vid temperaturer över 500°C, något som uppnås tidigt i de allra flesta försöken, ökar Φ -värdet svagt med ökad temperatur p g a att massflödet genom öppningen då minskar enligt ekvationen. Då massflödet minskar innebär det att mindre luft blir tillgängligt för förbränningen, och som bekant är Φ -värdet uteslutande beroende på bränsle/luftförhållandet.



Diagram 31. Principiellt utseende för Φ -värdet som funktion av temperaturen i övre brandgaslagret. Lägsta Φ -värdet erhålls vid ca 800 K. Observera att funktionen i diagrammet endast visar ett principiellt utssende av Φ -värdet som funktion av temperatur enligt ekvation 18, s 33.

4.3.2.4 Beylers ekvation

Genom att ange pyrolyshastigheten kan Φ -värden och temperaturer beräknas m h a CFAST. Med dessa utdata kan sedan Beylers ekvation beräknas. Dessa beräknade värden jämfördes sedan med de värden Beylers ekvation gav med uppmätta värden för Φ -värde och temperatur. Att säga att Φ -värdet mäts är en sanning med modifikation, egentligen rör det sig om ett beräknat värde grundat på uppmätta temperaturer, se kapitel 3.3.3 s 32.

Generellt gav simuleringarna för att vara i brandsammanhang mycket god överensstämmelse med verkligheten, se diagram 32. Medelvärdet av avvikelsen, redovisas i diagram 33, blev så låg som 9% av det uppmätta värdet. Den största avvikelsen som uppmättes blev 28%. Om hänsyn endast skulle tas till de försök där Beylers ekvation är intressant, d v s kring värdet 1, skulle felet blivit ännu mindre. Den goda överensstämmelsen visar att CFAST framförallt beräknar massbalansen ut och in genom öppningarna på ett bra sätt. Att temperaturen ofta överpredikteras när CFAST används får ingen avgörande betydelse då Beylers ekvation endast är svagt temperaturberoende. Ett felaktigt Φ -värde får mycket större konsekvens. För en fullständig redovisning av beräkning av Beylers ekvation hänvisas till bilaga C.



Diagram 32. Jämförelse mellan beräkning av Beylers ekvation med hjälp av uppmätta temperaturoch Φ -värden samt beräknade m h a CFAST.



Diagram 33. Avvikelsen relativa storlek vid beräkning av Beylers ekvation med indata från CFAST i förhållande till beräkning av Beylers ekvation beräknat med uppmätta värden.

5 Metoder för beräkning av förbränningsprodukter

5.1 Förbränningsprodukter

Som nämnts tidigare är ett av syftena med den här rapporten att utvärdera beräkningsmetoder för att bestämma brandgasernas sammansättning. Detta kan vara intressant både ur toxisk synvinkel och i frågan om antändning av brandgaslagret. När det gäller brännbarheten i brandgaslagret är det främst halten av brännbara gaser som CO, TUHC och H_2 som är intressant, men även halten av O_2 är intressant då denna i hög grad medverkar i förbränningsprocessen.

I denna rapport behandlar vi Beylers ekvation som medell för att bestämma om ett brandgaslager är brännbart eller inte. Ett annat sätt att bestämma brännbarheten, vilket även Beylers ekvation i grund och botten bygger på, är att direkt räkna på olika förbränningsprodukters brännbarhetsgränser och med hjälp av Le Chateliers princip (ekvation 27) räkna ut om brandgaslagret blir brännbart eller inte. För att kunna använda en sådan metod krävs det att man har en god kännedom om sammansättningen av förbränningsprodukter i brandgaslagret.

Nästa område som är av intresse när det gäller innehållet i brandgaserna är ur toxicitetssynpunkt, och i detta fallet är det främst CO och CO_2 som är aktuella. Av dessa båda anledningar har vi utvärderat några av de resultat som man kan få datorprogrammet CFAST, samt till viss del vad man kan få för resultat med en handberäkningsmetod. Här utvärderas endast CO och CO_2 av följande anledningar:

- Dessa bägge var tillsammans med O₂ de enda gaser som uppmättes i själva brandrummet i försöksserierna. I heptanförsöken uppmättes även TUHC, men inte i brandrummet utan i avgaskanalen, vilket medför att vi inte har kännedom om situationen i brandrummet till vilket den här rapporten är begränsad.
- Det är dessa båda gaser som är de absolut dominerande förbränningsprodukterna i brandgaserna.
- CO är både brännbar och toxisk, och således intressant ur två perspektiv.

5.2 Urvalsmetod

Till utvärderingen av CO och CO_2 valdes sju försök ut ur metanserien och sex från heptanserien. Urvalskriterier var endast att plocka ut försök där mätningar i brandrummet fungerade som de skulle och att det inte var något problem med mätutrustningen. Dessutom fanns intresse att välja ut försök med lite olika Φ -värden samt att ha med försök från båda försöksserierna så att bränslet varierades. Som bekant användes ett gasformigt bränsle i metanserien vilket möjliggjorde ett konstant massflöde, medan det vätskeformiga heptanet orsakade variationer i massflödet från bränsleytan p g a återstrålning.

5.3 Beräkningsmetoder

För att beräkna förbränningsprodukter använde vi oss av två olika metoder, handberäkningar och CFAST. Detta gjordes främst med tanke på att jämföra resultaten från de bägge beräkningssätten med uppmätta värden. En annan tankegång var att om resultaten är likvärdiga så finns det ju ingen anledning att använda den mer tidskrävande CFAST-metoden istället för en enkel handberäkning. Handberäkningarna som utfördes gjordes enligt ekvation 11 vilken beskrivs i kapitel 2.3.2, s 15.

Problemet med att använda CFAST är att ge bra indata till programmet. Det är användaren själv som styr hur fördelningen av förbränningsprodukterna skall användas av CFAST. Det gäller således att försöka hitta ett bra sätt att bestämma denna indata så att man kan få ut resultat som är användbara.

Ovan i kapitel 4.3.1.2, s 51, förklaras de delar som har betydelse för hur förbränningsprodukterna kommer att fördelas. Bränslets sammansättning är ofta känd under försöksförhållanden och annars kan typbränslen definieras vilket leder till värden för H/Cförhållande samt O_2 kan bestämmas. Det som återstår att ange för att få fram förbränningsprodukterna är förhållandet CO/CO₂. Dessa ingångsvärden använder sedan CFAST i sin massbalansekvation för att fördela bränslets kol-, väte- och syreatomer till de olika slutprodukterna som bildas vid förbränningen.

Som indata till CFAST valde vi ut tre olika ingångsförhållande för CO/CO₂. Detta gjordes med utgångspunkt från beräkningsmetoder som används för att beräkna olika halter för hand (Gottuk & Roby 1995; Karlsson & Quintiere1997). Det rör sig således om att bestämma produktionen av CO och CO₂ per massenhet brunnet bränsle för att ur detta få fram ett CO/CO₂-förhållande. Nedan förklaras de olika sätt som användes för att beräkna detta, vilket sedan användes som indata i CFAST.

• CFAST, $CO/CO_2 = 0,1$

Här valdes ett konstant förhållande mellan CO och CO_2 under hela brandförloppet. Detta är ett mycket grovt men i gengäld mycket enkelt att använda. Värdet valdes genom att snabbt studera förhållanden mellan CO och CO_2 från några av försöken i heptanserien. En studie av dessa visar att de uppmätta värdena från dessa ligger i detta område. Se bilaga D och E samt diagram 34 nedan.



Diagram 34. CO/CO₂-förhållande i de försök där ventilationskontroll inträffade.

• CFAST, "enkel yieldberäkning" (ey)

Detta förhållande mellan CO och CO2 är bestämt från yielderna som beräknas via

ekvationerna 5, 6, 7 och 10. Observera att i ekvation 10 beräknas de normaliserade yielden. När CO/CO_2 -förhållandet beräknats fram används det som indata till CFAST.

- **CFAST, "tangens yieldberäkning" (ty)** Detta förhållande mellan CO och CO₂ är bestämt från yielderna som beräknas via ekvationerna 3, 4 och 10. När CO/CO₂-förhållandet beräknats fram används det som indata till CFAST.
- Hand, "enkel yieldberäkning" (ey)

Handberäkningar av CO-halten där yield CO beräknas via ekvationerna 5, 6 och 7. Efter att yielderna beräknats bestäms CO-koncentrationen enligt ekvation 11.

• Hand, "tangens yieldberäkning" (ty) Handberäkningar av CO-halten där yield CO beräknas via ekvationerna 3 och 4. Efter att yielderna beräknats bestäms CO-koncentrationen enligt ekvation 11.

Utöver ovanstående ingångsvärde användes även de verkliga värdena som mättes upp i proben av CO och CO₂ som indata till CFAST. Detta gav en referens mellan det verkliga förhållandet och resultatet från CFAST. Dessa värdena är dock inte med i bilaga D och E, både av diagramtekniska skäl samt det faktum att man kan ställa frågan om de verkligen är intressanta att ha med då man inte har tillgång till dem när man skall simulera ett brandförlopp. Istället är det intressantare att ha en metod som ger ett hyfsat resultat vid en simulering. Generellt gav dessa uppmätta CO/CO₂-förhållande som indata ganska stora övervärden, speciellt i början av försöken. Detta medför att diagrammen och de andra kurvorna blir svårare att tolka. Resultaten blev dock överlag det samma för alla försök. Nedan visas resultat från en typisk simulering då de uppmätta värdena användes som indata till CFAST.



Diagram 35. Resultat av CFAST-beräkning av CO-halt i brandrummet. Lägg märke till hur mycket CO-koncentrationen överpredikteras när det uppmätta CO/CO2₂-förhållandet används som indata (CFAST verklig). Diagrammet hämtat från metanförsök 6.

5.4 Utvärdering CO

CO-halterna från de utvalda försöken, såväl uppmätta som beräknade av CFAST eller för hand, visas i bilaga D. En översikt av samtliga försök som innefattas av CO-beräkningarna visas nedan i form av stapeldiagram. Diagrammen är uppdelade i tidiga värden och sena värden samt att några av metanförsöken i det sena skedet även är uppdelade i a och b. De tidiga är värden som är plockade i intervallet 95-200 sekunder från försökets början, och de sena värdena är plockade från tidpunkter på 200 sekunder eller senare. Detta är gjort för att lättare kunna ge en rättvis bild av hur de olika beräkningssätten fungerar. De tidiga värdena beskriver brandens tidiga förlopp under uppbyggnaden av brandgaslager o s v. De sena värden visar hur situationen är när branden stabiliserat sig.

Med hjälp av denna metod med två grupper undviker vi orimlig påverkan på medelvärden mm orsakat av den korta men höga CO-produktionen i de flesta försöks början, d v s under perioden "tidiga". Mer om urvalskriterierna återfinns i kapitel 4.3.2.1 ovan. Att diagrammen över de olika försöken i bilaga D visar en långsammare ökning för de uppmätta värdena har att göra med att det är en viss tidsförskjutning på mätvärdena innan dessa loggas i mätdatorn, vilket inte tagits någon hänsyn till vid simuleringen. Därför bör hänsyn tas till detta när resultaten jämförs. Det bör också påpekas att i metanförsöken erhölls i de flesta fallen väldigt höga CO-koncentrationer i försökens inledningsskede, något som inte riktigt avspeglar ett normalt verkligt brandförlopp. Därför bör inte alltför stor vikt läggas vid de resultat som ges under rubriken tidiga.

5.4.1 Försökens tidiga skede

Nedan visas diagram över de uppmätta och beräknade värdena för det tidiga skedet. Medelvärdet av Φ -värdet vid de punkter som analyserades var 0,87 medan medeltemperaturen var 438°C.



Diagram 36. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta CO-koncentrationer hämtade från försökens tidiga skede.



Diagram 37. Avvikelse från uppmätt CO-koncentration. Värden hämtade från försökens tidiga skede.

De värden som användes till diagrammen ovan användes också för att få fram statistiska mått på spridningen av resultaten. Dessa redovisas i tabellform nedan.

Tabell 4. Medelvärden av	avvikelsen från	uppmätt värde vid	l beräkning med	olika metoder.
--------------------------	-----------------	-------------------	-----------------	----------------

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty	Hand ey	Hand ty
Medelvärde av avvikelsen ¹⁰	-0,02	-0,43	-0,50	-0,34	-0,49
(vol %)					
Medelvärde av	0,30	0,49	0,57	0,35	0,57
absolutbeloppet av					
avvikelsen ¹¹ (vol %)					

Det som kanske är mest intressant är vad vi får för avvikelse från det uppmätta resultatet samt vilken av de olika beräkningsmetoderna som ger bäst resultat. För att bestämma storleken på avvikelsen mellan den uppmätta CO-halten och den beräknade används samma sätt som för temperaturen, det vill säga förhållandet mellan avvikelse och uppmätt värde kontrolleras på följande sätt:

$CO_{CFAST} - CO_{försök}$	abuation 38
CO försök	ervation 56

där

CO_{CFAST}	= den av CFAST beräknade CO-halten	[vol%]
CO _{försök}	= den vid försöken uppmätta CO-halten	[vol%]

Nedan visas hur förhållandena mellan de uppmätta och de beräknade CO-halterna är för tidiga delen av förloppet i försöken.

¹⁰ Med medelvärde av avvikelsen menas $\left(\sum (vol \% CO_{beräknat} - vol \% CO_{uppmätt})\right)/n_i$ där *n* är antalet försök.

¹¹ Med absolutbeloppet av avvikelsen menas $|vol \% CO_{beräknad} - vol \% CO_{uppmätt}|$.



Diagram 38. Relativ avvikelse från uppmätt värde vid olika beräkningsmetoder. Avvikelsen jämförs med uppmätt värde och anges i procent. Värdena hämtade från försökens tidiga skede. Som synes fås i ett flertal beräkningar resultat som ligger i storleksordningen 100% lägre än det uppmätta värdet. Detta beror på att beräkningsmodellerna överlag ger mycket lägre värden än de oväntat höga COkoncentrationer som uppmättes i försökens början. T ex ger de enkla yieldberäkningarna att COkoncentrationen är 0 i ett flertal försök vilket i ovanstående diagram resulterar i -100%.

Tuben 5. medervarae av avvikelse i jornananae nu appman varae angivna i proceni.						
	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty	Hand ey	Hand ty	
Medelvärde av relativ	112	-52	-57	-52	-54	
avvikelse ¹² (%)						
Medelvärde av	133	56	61	53	60	
absolutbeloppet av relativa						
avvikelsen (%)						

Tabell 5. Medelvärde av avvikelse i förhållande till uppmätt värde angivna i procent.

Nedan listas slutsatser som kan dras efter att ha analyserat diagram och tabeller. När dessa siffror tolkas bör man komma ihåg att många av försöken gav mycket höga CO-koncentrationer under den tid som analyseras, förmodligen betydligt högre än vid en verklig rumsbrand.

- I de flesta försöken låg CO-halten runt 1,5 vol% förutom vid ett par försök med låga Φ -värden där halterna låg runt 0,5 vol% eller lägre.
- CFAST 0,1 ger här det jämnaste resultatet och den minsta avvikelsen.
- Med de övriga metoderna spelar det ingen roll om man räknar för hand eller via CFAST.
- Det relativa avvikelsen är för CFAST 0,1 ganska stort (112 %). Detta är dock missvisande då metan 5, heptan 3 och heptan 4 ger mycket låga CO-koncentrationer i början av försöken vilket leder till ett stort relativt fel. Om dessa försök räknas bort blir istället medelvärdet av den relativa avvikelsen endast 1 %.
- Absolutbeloppet av det relativa felet ligger på 133 % för CFAST 0,1 då värdena från metan 5, heptan 3 och heptan 4 medräknas. Utan dessa blir felet istället 22 %.
- Om man tar bort de värden med låga -värden ger CFAST 0,1 bäst resultat. Omvänt kan man också säga att ett konstant förhållande inte alls fungerar vid låga Φ-värden.

¹² Avvikelsen beräknad med ekvation 38, s 63.

• Med samtliga metoder får man för låga värden överlag.

5.4.2 Försökens sena skede

På samma sätt som för det tidiga skedet analyseras även det sena (t>200 sekunder). Nedan visas diagram över de uppmätta och beräknade värdena för det sena förloppet. Φ -värdets och temperaturens medelvärde var vid de analyserade punkterna 1,28 respektive 592°C.



Diagram 39. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta CO-koncentrationer. Värden hämtade från försökens sena del.



Diagram 40. Avvikelse från uppmätt CO₂-koncentration. Värden hämtade från försökens sena skede.

jorsonen sena aei.					
	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty	Hand ey	Hand ty
Medelvärde av avvikelsen	0,02	0,12	-0,15	0,11	-0,07
(vol %)					
Medelvärde av	0,28	0,42	0,64	0,38	0,61
absolutbeloppet av					
avvikelsen (vol %)					

Tabell 6. Medelvärden beräknade för avvikelse från uppmätta koncentrationer. Värden hämtade från försöken sena del.

Precis som för de tidiga värdena beräknades den relativa avvikelsen i förhållande till de uppmätta värdena. Resultatet redovisas nedan.



Diagram 41. Avvikelsen relativa storlek i förhållande till uppmätta värden med olika beräkningsmetoder. Värdena hämtade från försökens sena del.

Tabell 7. Medelvärden av avvikelser från uppmätta värden. Värdena hämtade från försökens sena del.

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty	Hand ey	Hand ty
Medelvärde av relativ	10	20	-4	17	2
avvikelse (%)					
Medelvärde av	23	37	56	41	54
absolutbeloppet av relativa					
avvikelsen (%)					

Följande kan konstateras ur diagram och värden:

- I försökens sena skede är CO-halten mer varierande än i det tidiga skedet. COkoncentrationen ligger mellan 1-2 vol% förutom vid ett par försök med låga Φ-värden där halterna ligger runt 0,5 vol%, samt även sent i metan 15b då CO-halten sjunkit rejält. Högre värden erhölls i heptan 3 och heptan 10 med koncentrationer på 2-2,5 vol%.
- Bäst värde ger CFAST 0,1 om man undantar metan 5 där Φ -värdet är lågt.
- Överlag sjunker CO-halten i det sena skedet. Detta kan man tydligt se i diagrammen över CO-halterna som visas i bilaga D. Detta kan förklaras av höga temperaturer i

brandrummet, medeltemperaturen ligger på 592°C, vilket leder till att CO oxideras till CO₂. Detta fenomen behandlas mer i kapitel 2.3.3, s 18.

- I det sena skedet är felen ganska spridda, d v s beräkningsmetoderna ger både för stora och för små värden.
- Felmarginalen ligger i samma storleksordning som för det tidiga skedet.
- Även i det sena skedet ger CFAST 0,1 det bästa resultatet av de analyserade metoderna. Dock ges fortfarande betydande fel vid låga Φ -värden.

5.5 Utvärdering CO₂

 CO_2 -halterna från de utvalda försöken, såväl uppmätta som beräknade med CFAST, visas i bilaga E. En översikt av samtliga försök som innefattas av CO_2 -beräkningarna visas nedan i form av stapeldiagram. Diagrammen är uppdelade på samma sätt som för CO-beräkningarna, d v s i tidiga (95s-200s) och sena (>200s) värden. För CO_2 finns det inga handberäkningar utförda. För att beräkna CO_2 -halten användes samma metodik som för CO, d v s genom att först beräkna yielder.

5.5.1 Försökens tidiga skede

Nedan visas diagram över de uppmätta och beräknade värdena för det tidiga skedet. Värdena är hämtade i samma punkter i tid som i motsvarande diagram för CO. Alltså blir Φ -medelvärdet 0,87 och medeltemperaturen 438°C även här.



Diagram 42. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta CO₂-halter. Värden hämtade från försökens tidiga skede.



Diagram 43. Avvikelsen från uppmätt värde vid beräkning med olika metoder för indata till CFAST. Värden hämtade från försökens tidiga skede.

Tabell 8. Medelvärden av avvikelsen från uppmätta värden. Värden hämtade från försökens tidiga skede.

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty
Medelvärde av avvikelsen (vol %)	-0,76	-0,53	-0,45
Medelvärde av absolutbeloppet av avvikelsen (vol	1,58	1,49	1,43
%)			

För att bestämma förhållandet mellan avvikelsen och den beräknade CO-halten används samma förfaringssätt som för CO, d v s ekvation 41, vilket redovisas nedan i diagram 43.



Diagram 44. Den relativa avvikelsen i förhållande till uppmätta värden vid olika beräkningsmetoder. Värden hämtade från försökens tidiga skede.

Tabell 9. Medelvärden av avvikelsen för olika beräkningsmetoder. Värden hämtade från försökens tidiga skede.

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty
Medelvärde av relativ avvikelse (%)	-10	-5	-6
Medelvärde av absolutbeloppet av relativa	21	18	19
avvikelse (%)			

Med hjälp av ovanstående tabell och daigram kan följande iakttagelser göras:

- I metanförsöken är den verkliga CO₂-halten lägre än de beräknade. Detta blir den även om man tar hänsyn till eventuell tidsfaktor vid mätningen. I heptanförsöken stiger den verkliga CO₂-halten dock oftast snabbare än den beräknade.
- För metanförsöken har beräkningarna en tendens att ge något för höga värden medan de för heptanförsöken ger något för låga.
- Resultaten mellan de olika metoderna är likvärdiga. Bästa resultatet ger beräkningar med CFAST ey.
- Felmarginalen ligger runt 20%.

5.5.2 Försökens sena skede

På samma sätt som för det tidiga förloppet analyseras även det sena (>200 sekunder). Även de sena värdena är hämtade från samma tidpunkter som för CO medförande att även här är Φ -medelvärdet 1,28 och medeltemperaturen 592°C. Nedan visas diagram över de uppmätta och beräknade värdena för det sena förloppet.



Diagram 45. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta CO₂-koncentrationer. Värden hämtade från försökens sena skede.



Diagram 46. Avvikelsen från uppmätt värde vid olika beräkningsmetoder. Värdena hämtade från försökens sena skede.

Tabell 10. Medelvärden av avvikelsen	vid olika beräkningsmetoder.	Värden hämtade från försökens
sena skede.		

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty
Medelvärde av avvikelsen (vol %)	-1,60	-1,39	-1,49
Medelvärde av absolutbeloppet av avvikelsen (vol	1,88	1,53	1,72
%)			

Nedan visas hur förhållandena mellan de uppmätta och de beräknade CO₂-halterna är för sena delen av förloppet.



Diagram 47. Avvikelsen i förhållande till uppmätta värden för de olika beräkningsmetoderna uttryckt i procent. Värden hämtade från försökens sena skede.

	CFAST 0,1	CFAST ey	CFAST ty
Medelvärde av relativ avvikelse (%)	-17	-13	-16
Medelvärde av absolutbelopp av relativ avvikelse	20	14	18
(%)			

Tabell 11. Medelvärden	för den i	relativa avvikelsen.	Värden hämtade	från	försökens	sena skede.

Följande kan konstateras ur diagram och mätdatan:

- I detta skede är CO₂-halten ganska konstant om man jämför mellan de olika försöken. Huvuddelen av försöken ligger runt 10 vol%. Avviker från detta gör endast de försök med låga Φ-värden där halterna låg runt 3 vol%. Jämfört med de tidiga värdena har CO₂-halten alltså ökat något.
- Beräkningarna av metanförsöken ger generellt större fel än beräkningar av heptanförsöken. Överlag är värdena som beräknas för låga.
- För CO₂ ger CFAST 0,1 sämst värde medan CFAST ey ger det bästa. Dock är det ingen stor skillnad mellan metoderna.
- Felen är ganska små överlag. Ca 20 % i medeltal.

5.6 Slutsatser

Då utvärderingen bygger på 13 försök innefattande endast två typer av bränsle kan det vara svårt att dra någon helt korrekt slutsats över beräkningsresultaten. För att kunna dra bättre slutsatser och utvärdera de resultat som CFAST ger skulle man helst köra många fler försök med olika rumsgeometrier, bränslen, ventilationsförhållanden etc och kanske fundera mer över sättet att ge indata. Dock kan det ur resultaten konstateras en rad konkreta trender. Nedan redovisas en rad slutsatser som dras ur de beräkningarna som är gjorda.

5.6.1 CO-beräkningar

- Beräkning med ett konstant förhållande (CFAST 0,1) i CFAST ger vid låga Φ-värden (<0,5) en mycket stor överskattning av CO-halten. Annars ger denna metod överlag de bästa resultaten.
- Vid låga Φ-värden som i försöken metan 5 och heptan 4 vilka ligger under 0,5, kan man inte använda sig av ekvationerna 5, 6 och 7 "enkel yield-beräkning" för att beräkna yield CO och sedan eventuellt en CO-halt. Denna modell ger att CO-halten är noll upp till att Φvärdet är 0,5.
- Ekvation 3 och 4 "tangens yield-beräkning" ger mycket bra resultat vid låga Φ-värden (<0,7) när denna används till indata i CFAST. Även vid handberäkningar ger den bra resultat.
- Beräkning med ekvation 3 och 4 "tangens yieldberäkning" tenderar att ge en för låg COhalt vid en kombination av höga temperaturer och Φ-värden som ligger i intervallet 0,7-1,4. Detta då denna modell är temperaturberoende och ger lägre CO-yield vid högre temperatur, se diagram 8 s 17. Då CFAST även överpredikterar temperaturen medför detta att denna ekvation används lite felaktigt med en för låg CO-halt som följd vilket kan utläsas i exempelvis försök metan 8.
- I det tidiga skedet underskattas CO-halten generellt för alla metoder, dock inte riktigt lika mycket med CFAST 0,1. Med denna metod ligger felmarginalen i storleksordningen 620% vilket får betraktas som godkänt.
- Oavsett om man använder sig av den "enkla yield-beräkningen" eller "tangens yieldberäkningen" för att beräkna yield CO blir resultaten likvärdiga om man räknar för

hand eller genom CFAST, d v s med samma ingångsvärden av yield CO blir resultatet mycket lika oavsett om man räknar för hand eller genom CFAST.

5.6.2 CO₂-beräkningar

- CFAST ger nästan identiska resultat oavsett vilken ekvation man använder för att skapa indata. Detta medför att skall man använda CFAST för att beräkna halten av CO₂ kan man med fördel använda den enklaste formen.
- CO₂-halten blir underpredikterad i storleksordningen 20% av CFAST. Dock ger CFAST ett lite högre värde i början av brandförloppet.
- Några av försöken ger ganska stora fel, speciellt heptan 3 och heptan 4 i det tidiga skedet. Dessa gav även stora fel när CO-halten skulle bestämmas. Detta kan bero på något i försöken, något som vi dock inte kunnat utreda.
- De största felen blir när man har låga Φ -värden då fel på upp till 60% kan konstateras, dock just för försök heptan 4 (se ovan.).
- Vid låga Φ-värden är det rimligt att beräkningar med ekvationerna 5,6 och 7 "enkel yieldberäkning" skulle ge bättre resultat vid handberäkningar. Denna ekvation bygger på antagandet att inget av bränslet blir till CO. Detta skulle givetvis ge ett högre resultat på CO₂-halten och då denna överlag är för låg borde därmed resultatet bli bättre. Vid simuleringar med CFAST kan CO/CO₂-förhållandet enkelt justeras till ett lägre värde.

5.7 Ingenjörsmässiga rekommendationer

Det som kanske är mest intressant är vad man som ingenjör skall använda sig av för metod för att räkna fram en vettig halt av exempelvis CO. Vid t ex en rökfyllnadsberäkning för att kontrollera personsäkerheten vid utrymning vill man ha en metod som inte är för krånglig att använda och som samtidigt ger ett användbart resultat. Nedan ges några rekommendationer över hur man skall beräkna CO-halten som bygger på de resultat som har konstaterats ovan.

- Då handberäkningar och CFAST ger likvärdiga resultat är det i många fall lika enkelt att använda handberäkningar som att använda CFAST för att beräkna CO-halten. Speciellt i de fall då man räknar på ett rum.
- Vid beräkningar som omfattar flera rum är det lämpligt att använda CFAST. Att beräkna flera rum för hand leder till omfattande och komplicerade beräkningar. I denna rapport har det endast utvärderats hur resultatet blir vid beräkningar med ett rum, men med ledning av tidigare utförda undersökningar av CFASTs giltighet för andra parametrar är en gissning att modellen fungerar på ett någorlunda acceptabelt sätt för beräkning av förbränningsprodukter i åtminstone direkt angränsande rum till brandrummet.
- Vid höga Φ -värden, d v s vid ventilationskontroll, kan man med fördel använda ett konstant förhållande mellan CO och CO₂ på 0,1 i CFAST. Detta ger det bästa resultatet och är dessutom den absolut lättaste metoden. Misstänker man ventilationskontroll är det lämpligt att man kontrollerar Φ -värdet via utdata från CFAST, se kapitel 4.3.2.3, s 54.
- Vid låga Φ-värden (Φ<0,7) är det lämpligt att sätta upp ekvationerna 3 och 4 "tangens yield-beräkning" tillsammans med ekvation 10 och på så sätt beräkna ett förhållande mellan CO och CO₂.
- Vid fall där temperaturen överstiger 875 K samtidigt som Φ-värdet ligger i intervallet 0,7-1,4 bör "enkel yiedberäkning" eller konstant värde användas. "Tangens yieldberäkning" ger i detta område för låga CO-koncentrationer.
• Vid kontroll av brandgasernas innehåll då man kontrollerar utrymningssäkerheten skall man ha i minnet att man överlag får för låga CO-halter vid simuleringar med CFAST. Dock uppnås halter som betraktas som kritiska¹³ mycket fort i de flesta fall.

Ett problem då man skall bestämma CO-halten är att få fram ett Φ -värde. Ofta känner man inte massförlusten hos det som brinner. Precis som i alla andra fall när man skall beräkna temperaturen eller för rökfyllnadsberäkningar gäller det att bygga upp ett troligt scenario med rimliga antaganden i sina beräkningar. Det är ganska självklart att man inte kan förutsäga en händelseutveckling till punkt och pricka. Ofta vid ett upplägg av ett scenario utgår man från en antagen effektutveckling eller effektutvecklingar som är uppmätta från olika försök. Om CFAST ska kunna användas för att få fram ett Φ -värde måste dock en annan taktik angripas.

Istället för att definiera en RHR-kurva anges en pyrolyskurva. Dessa kurvor hänger samman med varandra, och om den ena ändras i CEdit kommer den andra följa med automatiskt via det Δ H_C man angivit. I själva beräkningen skiljer dock CFAST på om det är RHR eller massförlust som definierats. Om en pyrolyskurva anges kommer programmet begränsa effektutvecklingen till mängden syre tillgängligt, men fortsätta att låta bränslet pyrolysera i den takt som angivits i kurvan. Även då en RHR-kurva definieras kommer effektutvecklingen begränsas beroende på mängden syre som är tillgängligt, men nu begränsas även pyrolysen av detta. Alltså kommer inget bränsle förutom det som förbränns att pyrolyseras av modellen om en RHR-kurva anges i Cedit. Lämpliga pyrolyshastigheter kan men få fram på ett flertal sätt. En enkel metod är att använda tänkt RHR-kurva och räkna om det till pyrolys via förbränningsvärmet Δ H_C. För pölbränder finns metoder framtagna för att just beräkna förångningen av bränslet.

Exempel på hur det skulle kunna gå till vid en beräkning av CO-halten med CFAST redovisas nedan:

- 1. Den aktuella byggnaden man skall utföra sina beräkningar på definieras i CFAST. Rumsgeometrier och öppningar läggs in.
- 2. Det dimensionerande brandförloppet bestäms som en pyrolyskurva.
- 3. Det aktuella bränslets specifika egenskaper bestäms, d v s ΔH_C och bränslesammansättning som H/C och O/C (se kapitel 4.3.1.2, s 51). En bra start kan även vara att om man tror att ventilationskontroll kommer att inträffa kan man redan nu sätta CO/CO₂ till 0,1.
- 4. Simulering med CFAST.
- 5. Utdata exporteras till Excel eller annat kalkylprogram och där sätts ekvation 1 upp för att kontrollera Φ-värdet.
- 6. Om Φ-värdet är lågt, Φ<1, bör ekvationerna 3 och 4 "tangens yielsberäkning" tillsammans med ekvation 10 användas för att beräkna förhållandet mellan CO och CO₂. Är Φ-värdet > 1 kan de värden som redan är beräknade av CFAST användas. Om temperaturen överstiger 875 K bör "tangens yieldberäkning" undvikas i intervallet 0,7<Φ<1,4. Använd istället "enkel yieldberäkning" eller konstant värde.
- 7. Om Φ -värdet är lågt definieras de beräknade värdena ovan på nytt i CFAST i form av nytt CO/CO₂-förhållande.
- 8. Ny simulering med CFAST som ger nya värden på CO.

¹³ I NKB's bestämmelser krävs att personer under utrymning inte utsätts för en CO-halt > 2000 ppm (Brandskyddslaget 1994)

6 REFERENSFÖRTECKNING

Andersson, B. Baubrauskas, V. Holmstedt, G. Särdqvist, S. Winter, G. *Simulated Fires in Substances of Pesticide Type*. Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola. Lund. 1996.

Bengtsson, L-G & Karlsson, B. *Fenomenen övertändnng, backdraft och brandgasexplosion*. Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola. Lund. 1997.

Beard, A.N. & Drysdale, D.D., Holborn, P.G., Bishop, S.R.. A Model of Instability and Flashover, Journal of applied Fire Science, vol 41. 1994

Brandskyddslaget, LTH-Brandteknik. Brandskydd. Stockholm. 1994.

Chitty, R. A survey of backdraft. Fire Research and Development group, Home Office. 1994.

Gottuk, D.T. & Roby, R.J. *Effect of Combustion Conditions on Species Produktion, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition.*1995.

Gottuk, D.T., Roby, R.J., Michelle, P.J., Beyler, C.L., *Carbonmonoxide Produktion in Compartment Fires, Journal of Fire Protection Engineering*, pp 133-150, (4). 1992.

Janssens, M, Caliometry, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition. 1995.

Karlsson, B. & Quintiere, J.G. *Enclosure Fire Dynamics*. Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola. Lund. 1997

Lundin, J. *Uncertainty in smoke transport models*. Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola. Lund. 1997

Mulholland, G.W. *Position Paper Regarding CO Yield. Appendix C in Nelson, H.E., "FPETOOL: Fire Protection Engineering Tools for Hazard Estimation"*, National Institute of Standards and Technology Internal Report 4380, pp 93-100, Gaithersburg. 1990.

Peacock, R.D Jones, W.W Fomey, G.P Portier, R.W Reneke, P.A Bukowski, R.W Klote, J.H. *An update Guide for HAZARD I Version 1.2.* National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. 1994.

Simmons, R.F. & Wolfhard, H.G. Comb. and Flame. 1957

Bilaga A; Temperatur beräknad m h a CFAST och uppmätta värden från försök







Diagram A 2. Metan 2.



Diagram A 3. Metan 3.



Diagram A 4. Metan 4.



Diagram A 5. Metan 5.



Diagram A 6. Metan 6.



Diagram A 7. Metan 7.



Diagram A 8. Metan 8.



Diagram A 9. Metan 9.







Diagram A 11. Metan 11.



Diagram A 12. Metan 12.



Diagram A 13. Metan 13.



Diagram A 14. Metan 14.



Diagram A 15. Metan 15.



Diagram A 16. Metan 16.



Diagram A 17. Metan 17.



Diagram A 18. Heptan 3.



Diagram A 19. Heptan 4.



Diagram A 20. Heptan 5.



Diagram A 21. Heptan 6.



Diagram A 22. Heptan 7.



Diagram A 23. Heptan 8.



Diagram A 24. Heptan 9.

Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter - en utvärdering Bilaga A; Temperatur beräknad m h a CFAST och uppmätta värden från försök



Diagram A 25. Heptan 10.



Diagram A 26. Heptan 11.



Diagram A 27. Heptan 12.



Diagram A 28. Heptan 13.

Bilaga B; • -värde beräknat m h a CFAST och uppmätta värden från försök







Diagram B 2. Metan 2



Diagram B 3. Metan 3



Diagram B 4. Metan 4



Diagram B 5. Metan 5



Diagram B 6. Metan 6



Diagram B 7. Metan 7



Diagram B 8. Metan 8



Diagram B 9. Metan 9



Diagram B 10. Metan 10



Diagram B 11. Metan 11



Diagram B 12. Metan 12



Diagram B 13. Metan 13



Diagram B 14. Metan 14



Diagram B 15. Metan 15



Diagram B 16. Metan 16



Diagram B 17. Metan 17



Diagram B 18. Heptan 3



Diagram B 19. Heptan 4



Diagram B 20. Heptan 5



Diagram B 21. Heptan 6



Diagram B 22. Heptan 7



Diagram B 23. Heptan 8



Diagram B 24. Heptan 9

Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter - en utvärdering Bilaga B; • -värde beräknat m h a CFAST och uppmätta värden från försök



Diagram B 25. Heptan 10



Diagram B 26. Heptan 11



Diagram B 27. Heptan 12



Diagram B 28. Heptan 13

Bilaga C; Beylers ekvation beräknad m h a CFAST och uppmätta värden från försök



Diagram C 1. Metan 3.



Diagram C 2. Metan 4.



Diagram C 3. Metan 6.



Diagram C 4. Metan 7.



Diagram C 5. Metan 8.



Diagram C 6. Metan 9.



Diagram C 7. Metan 10.



Diagram C 8. Metan 11.



Diagram C 9. Metan 12.



Diagram C 10. Metan 13.



Diagram C 11. Metan 14.



Diagram C 12. Metan 15.



Diagram C 13. Metan 16.



Diagram C 14. Metan 17.



Diagram C 15. Heptan 3.



Diagram C 16. Heptan 8.



Diagram C 17. Heptan 11.



Diagram C 18. Heptan 12.



Diagram C 19. Heptan 13.

Bilaga D; CO-koncentration beräknad och uppmätt vid försök



Diagram D 1. CO-koncentration i försök metan 4 ($\Phi \approx 1,4$).



Diagram D 2. CO-koncentration i försök metan $5(\Phi \approx 0,2)$.



Diagram D 3. CO-koncentration i försök metan $6(\Phi \approx 1, 4)$.



Diagram D 4. CO-koncentration i försök metan $8(\Phi \approx 1, 1)$.



Diagram D 5. CO-koncentration i försök metan 9 ($\Phi \approx 1, 8$).



Diagram D 6. CO-koncentration i försök metan $14(\Phi=0,8-1,4)$.



Diagram D 7. CO-koncentration i försök metan $15(\Phi=1,2-1,6)$.



Diagram D 8. CO-koncentration i försök heptan 3 (Φ =0,5-1,5).



Diagram D 9. CO-koncentration i försök heptan 4 (Φ =0,1-0,3).



Diagram D 10. CO-koncentration i försök heptan 7 (Φ =0,5-1,0).



Diagram D 11. CO-koncentration i försök heptan 8 (Φ =0,5-1,3).



Diagram D 12. CO-koncentration i försök heptan 9 (Φ =0,5-1,2).



Diagram D 13. CO-koncentration i försök heptan 10 (Φ =1,0-2,5).

Bilaga E; CO₂-koncentration beräknad m h a CFAST och uppmätta värden vid försök



Diagram E 1. CO₂-koncentration i metan 4.



Diagram E 2. CO₂-koncentration i metan 5.



Diagram E 3. CO₂-koncentration i metan 6.



Diagram E 4. CO₂-koncentration i metan 8.



Diagram E 5. CO₂-koncentration i metan 9.



Diagram E 6. CO₂-koncentration i metan 14.



Diagram E 7. CO₂-koncentration i metan 15.



Diagram E 8. CO₂-koncentration i heptan 3.

Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter - en utvärdering Bilaga E; CO₂ -koncentration beräknad och uppmätt vid försök



Diagram E 9. CO₂-koncentration i heptan 4.



Diagram E 10. CO₂-koncentration i heptan 7.



Diagram E 11. CO₂-koncentration i heptan 8.



Diagram E 12. CO₂-koncentration i heptan 9.



Diagram E 13. CO₂-koncentration i heptan 10.

Bilaga F; Beskrivning av försök

Metanförsöken

Nedan ges en kort översikt över de olika försöken. De data som presenteras är:

- Öppningsgeometrier (B×H)
- Gasflöde för metanförsöken
- Eventuella fel med mätutrustning
- Probplacering

Försök metan 1

Öppning:14,5×50 cmGasflöde:Varierar från 0,66 g/s till ca 1 g/sFel:Probresultat tveksamma p g a igensotning.Prob:Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.

Försök metan 2

Öppning: 10×50 cm

Gasflöde: Ca 1 g/s

Fel: Probresultat felaktiga p g a att den var igensatt med sot.

Prob: Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.

Försök metan 3

Öppning: 10×40 cm

Gasflöde: Ca 1 g/s, sjunker mot slutet av försöket p g a tom tub

- Fel: Loggningen av kanal 2, 3, 4, 5 och 6 ur funktion. För mätningar inne i rummet (proben), samt tryck i kanalen för bestämning av RHR.
- Prob: Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
- Övrigt: P g a problem med dataloggen avlästes instrumenten manuellt efter 6 min: O_2 -mätaren 0,74 V (ca 1,5%), CO₂-mätare 9%, CO-mätare >1%.

Försök metan 4

Öppning: 10×40 cm

Gasflöde: Varierar från 1,0 g/s till 1,2 g/s

- Fel: Pumpen till mätning i kanalen sattes inte på förrän efter 2.30. Alltså är värdena i kanal 7, 8 och 9 ej tillförlitliga de första 3 min, ev. längre. Dessa kanaler är för bestämning av RHR.
- Prob: Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
- Övrigt P g a problemen med pumpen avlästes instrumenten manuellt vid 6.15: $O_2 = 20,52\%$, $CO_2 = 0,25\%$, CO = 0,01%

Försök metan 5

Öppning: 14,5×50 cm

Gasflöde: 0,3 g/s konstant

Fel:

- Prob: Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
- Övrigt: Manuell avläsning: I rummet 0% CO, 2,7% CO₂ och ?% O₂. I kanalen 0% CO, 0% CO₂ och ?% O₂.

Försök me	etan 6
Gasflöde:	1,1 g/s konstant
Fel: Prob:	- Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
Försök m	etan 7
Öppning:	8.5×35 cm
Gasflöde:	1.1 g/s konstant
Fel:	Tryckmätaren sattes inte på förrän efter 150 s.
Prob:	Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
Försök m	etan 8
Öppning:	10×50 cm
Gasflöde:	1,15 g/s konstant
Fel:	Slang till "analysinstrument" ej isatt efter kalibrering. Sattes i efter ca 10 s.
Prob:	Centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
Ovrigt:	Manuell avlasning: I rummet max% CO, max% CO ₂ . I kanalen 20,72% O ₂ .
	Mycket rok, dervis utanior nuven. Fick darior oka flaktnastigneten efter
	5.45.
Försök me	etan 9
Oppning:	8,5×42 cm
Gasflöde:	1,3 g/s konstant
Fel:	
Prob:	Centralt 1 rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen.
Försök m	etan 10
Öppning:	8,5×42 cm
Gasflöde:	1,3 g/s konstant
Fel:	-
Prob:	Proben flyttad vertikalt till en position 2 dm över golv i förhållande till metan 9.
Ovrigt	I övrigt identiskt med metan 9 och metan 11. Syftet med försöket var att variera
	probplaceringen
Försök m	etan 11
Öppning:	8,5×42 cm
Gasflöde:	1,3 g/s konstant
Fel:	Pumpen till RHR påslagen efter ca 1.30
Prob:	1 dm från den främre väggen, 1 dm från högerväggen och 1 dm från taket
Ovrigt	I ovrigt identiskt med metan 9 och metan 10. Syftet med forsoket var att variera probplaceringen
T 1	
Forsok me	etan 12
Oppning:	8,5×50 cm
Gasilode:	1,0 g/s 0-00s, 1,1 g/s 00-510s ocn 1,5 g/s 510s-
1.01.	gashalter i rummet

gashalter i rummet. Prob: Prob placerad som i metan 11.

Försök metan 13	
Öppning: 8,5×50 cm	
Gasflöde: 1,0 g/s 0-465s, 1,3 g/s 420-585s,1,4 g/s 585-660	s och 1,5 g/s 660-
Fel: -	-
Prob: Prob placerad 1 dm från höger vägg, 1,5 dm från	n taket och 7,5 dm in i rummet.
Övrigt: Försöken metan13, metan 14, metan 15 och met men olika konfigurationer på öppningen.	an 17 har samma öppningsfaktor

Försök metan 14

Öppning: 25×25 cm

Gasflöde: 0,8 g/s 0-270s, 1,0 g/s 270-385s, 1,1 g/s 385-570s, 1,2 g/s 570-705s och 1,3 g/s 705-

Fel:

Prob: Prob placerad som i försök metan 13.

Försök metan 15

Öppning: 25×24,5 cm, 25 cm hög tröskel

Gasflöde: 1,0 g/s 0-255s, 1,3 g/s 255-615s,1,5 g/s 615-780s och 1,6 g/s 780-

Fel:

Prob: Prob placerad som i försök metan 13.

Försök metan 16

Öppning: 10×40 cm

- Gasflöde: 0,5 g/s 0-95s, 0,6 g/s 95-240s, 0,7 g/s 240-540s, 0,8 g/s 540-645s, 0,9 g/s 645-1050s, 1,0 g/s 1050-
- Fel: Kondensvatten i probslangen efter försöket, har förmodligen inte inverkat på resultatet
- Prob: Prob placerad som i försök metan 13.

Försök metan 17

Öppning: 25,5×24 cm, 42 cm hög tröskel

Gasflöde: 0,65 g/s 0-330s, 0,80 g/s 330-435s, 0,95 g/s 435-585s, 1,2 g/s 585-860s,

- 1,0 g/s 860-950s, 1,2 g/s 950-990 och 1,3 g/s 990-
- Fel: Gasflödet sjönk konstigt enligt vågen mellan 860-950s av okänd anledning
- Prob: Prob placerad som i försök metan 13.

Heptanförsök

I dessa försök finns endast fullständiga data angående öppningsgeometrier och brännarbålets diameter tillgängliga varför det är dessa som redovisas nedan. Probplacering redovisas endast om det finns anteckningar om var den var placerad.

Heptan 3 Öppning: 20×46 cm Båldiameter: 30 cm Fel: -Övrigt: Efter ett tag självslocknade försöket

Heptan 4 Öppning: 46×66 cm Båldiameter: 30 cm Fel: Syrgasmäteren fungerade troligtvis, men RHR-värdena verkar konstiga. Övrigt: Proben placerad inne i hörnet *Heptan 5* Öppning: 46×66 cm Båldiameter: 20 cm Fel: Syrgasmätare ur funktion. Proben placerad längst in i rummet. Övrigt: *Heptan* 6 Öppning: 30×58 cm Båldiameter: 20 cm Fel: Övrigt: Proben placerad längst in i rummet. *Heptan 7* Öppning: 15×58 cm Båldiameter: 20 cm Fel: Övrigt: Proben placerad längst in i rummet. *Heptan* 8 Öppning: 15×58 cm Båldiameter: 30 cm Fel: Syrgasmätaren ur funktion men gick under försöket ner till ca 17.5% Proben placerad längst in i rummet. Övrigt: *Heptan 9* Öppning: 7×58 cm Båldiameter: 20 cm Fel: Heptan 10 Öppning: 7×58 cm Båldiameter: 30 cm Fel: Övrigt: Försök som skapade kraftiga pulsationer. Heptan 11 Öppning: 7×58 Båldiameter: 20 cm Fel: Övrigt: Upprepning av heptan 9 med probplacering längst ut i öppningen istället för att kunna jämföra O₂-koncentrationerna.

Heptan 12 Öppning: 7×20 cm Båldiameter: 20 cm Fel: -Övrigt: Proben placerad i öppningen längst ner.

Heptan 13 Öppning: 5×58 cm Båldiameter: 20 cm Fel: -Övrigt: Proben placerad i öppningen längst ner.