

FoU rapport

# Övertändning, backdraft och brandgasexplosion sett ur räddningstjänstens perspektiv



**RÄDDNINGSGS  
VERKET**

# FÖRORD

En brand, som till början är lokalt koncentrerad till ett eller ett fåtal objekt, kan relativt snabbt övergå till ett stadium där allt brännbart material i rummet pyrolyseras. Denna övergång kallas övertändning. Under det tidiga brandförloppet kan många olika situationer inträffa av vilka ett flertal kan innebära stora risker för räddningstjänstpersonal.

Det är därför viktigt, både ur risksynpunkt och släcktaktisk synpunkt, att undervisa och informera räddningstjänstpersonal om fenomenet övertändning, samt andra relaterade begrepp såsom backdraft och brandgasexplosion.

Det främsta syftet med detta arbete är att ge en grundläggande förståelse för de processer som sker under rumsbränder, speciellt vid övergången till den fullt utvecklade rumsbranden men också situationer då luft introduceras i en syrefattig miljö. Det är viktigt att förstå skillnaden mellan olika fenomen eftersom detta påverkar bedömningen av en eventuell släckinsats. Rapportens innehåll är till stora delar kvalitativt och den är främst skriven för personal som arbetar inom räddningstjänst men bör också intressera andra som vill få en fördjupad förståelse för brandförlopp i byggnader.

Arbetet har utförts med hjälp av litteraturundersökning, teoretiska beräkningar och experiment. Experimenten har utförts i såväl småskala som fullskala.

Denna rapport ersätter den föregående med titeln ” Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion” (gavs ut av SRV 1997).

Synpunkter på rapportens innehåll och upplägg mottags tacksamt av författare.

## **Övertändning, backdraft och brangasexplosion sett ur räddningstjänstens perspektiv.**

Rapporten har utarbetats av  
Lars-Göran Bengtsson  
Institutionen för brandteknik, Lunds tekniska högskola  
Författaren svarar för innehållet i rapporten.

Räddningsverkets kontaktperson:  
Sören Lundström. Enheten för Metod och teknik, telefon 054-10 43 36.

Denna rapport ingår i Räddningsverkets serie av forsknings- och utvecklingsrapporter.  
I serien ingår rapporter skrivna av såväl externa författare som av verkets anställda.  
Rapporterna kan vara kunskapssammanställningar, idéskrifter eller av karaktären tillämpad forskning.  
Rapporterna redovisar alltså inte alltid Räddningsverkets ståndpunkt i innehåll och förslag.

1998 Räddningsverket, Karlstad  
Räddningstjänstavdelningen

Beställningsnummer P212-250/98  
ISBN 91-88891-66-6  
1998 års utgåva

# **Flashover, Backdraft and Smoke Gas Explosion from a Fire Service Perspective**

**Lars- Göran Bengtsson**

**Dept. of Fire Safety Engineering  
Lund Institute of Technology**

## **ABSTRACT**

This report presents a detailed description of the phenomena flashover, backdraft and smoke gas explosion. The physical and chemical processes which are involved in these phenomena are thoroughly discussed.

The report also describes a number of compartment fire scenarios which are believed to be the most common scenarios occurring in Sweden. The description is based on a number of full-scale experiments which were carried out within the project.

At the end of the report, possible warning signs of a potential flashover and backdraft are discussed.

In the appendices, a number of models used to predict flashover are evaluated, using data from small scale experiments carried out within the project.

**Keywords:** flashover, backdraft, smoke gas explosion, warning signs

## SAMMANFATTNING

Denna rapport beskriver fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion ur ett internationellt perspektiv och klargör de fysiska och kemiska processer som är styrande.

Speciellt diskuteras vilken typ av flammor som är involverade när de olika fenomenen uppstår. Det är viktigt att skilja på olika flammor eftersom dessa till stor del styr hur snabbt brandförloppet går. Flammor kan vara av två typer, dels förblandade flammor där luft och bränsle är förblandade innan antändning sker, dels diffusionsflammor där bränslet och luften blandas först i förbränningszonen. En förblandad flamma rör sig med en hastighet av flera m/s medan en diffusionsflamma uppstår genom en mycket långsammare process.

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 antänds. Detta plötsliga och sammanhängande övergångsstadium av ökande brand kallas övertändning. Flammorna som uppstår vid en övertändning är till största del diffusionsflammor vilket medför att det är omöjligt att använda teorier för brännbarhetsgränser för att beskriva denna. Ord som mager och fet kan alltså inte användas för att beskriva en övertändning eftersom dessa begrepp är förknippade med förblandade gasmassor.

I en situation där branden har varit underventilerad en längre tid kan brandrummet komma att innehålla stora mängder oförbrända gaser. Om en öppning görs blandas den inkommande luftströmmen med de oförbrända gaserna. Hur mycket som förblandas beror framför allt på var en eventuell tändkälla befinner sig och hur lång tid efter att rummet öppnats som antändning sker. Även öppningens storlek och geometri är av betydelse. Om antändningen blir fördröjd kan stora delar av rumsvolymen bestå av en förblandad gasmassa när antändning sker, vilket kan leda till en snabb expansion av gaserna. Detta brukar kallas backdraft. En backdraft kan därför till stora delar utgöras av en förblandad flamma, men det vanliga är att den utgörs av en kombination av diffusionsflammor och förblandade flammor.

I vissa speciella situationer kommer det att vara möjligt för brandgaserna att blandas mycket väl med luften innan antändning sker. Detta inträffar oftast i utrymmen i närheten av brandrummet och konsekvenserna av detta kan bli en enorm tryckupbyggnad. En brandgasexplosion styrs till stor del av en förblandad process. Hur kraftigt tryck som byggs upp beror framför allt på byggnadsdelarnas trycktålighet, storleken på rummets läckageareor, och hur stor den förblandade gasmassan är när antändning sker.

Det kan konstateras att de tre fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion är nära besläktade och att i vissa gränsfall kan det vara svårt att klart skilja det ena fenomenet från det andra. En backdraft kan resultera i en övertändning. En underventilerad brand kan resultera i en kraftig backdraft, vilket möjligtvis kan kallas för brandgasexplosion.

Internationellt är det ofta fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion som orsakar skador och dödsfall hos räddningstjänstpersonal. Det är därför av största vikt att räddningstjänstpersonal är informerade om tänkbara varningssignaler.

Kännetecken måste bedömas utifrån den specifika situationen och tonvikten skall inte läggas på ett kännetecken. Om man däremot väger samman ett antal kännetecken kan man få en bra uppfattning om en nära förestående backdraft eller övertändning.

Tyvärr används ofta brandgasernas färg som ett säkert kännetecken på en nära förestående övertändning eller backdraft. Det är dock inget tillförlitligt kännetecken. Brandgasernas färg är beroende av vilket material som brinner.

I appendix utvärderas olika modeller som används till att uppskatta risken för övertändning. Utvärderingen sker med hjälp av data från småskaleförsök, som genomfördes under projektet. Utvärderingen visar att vissa av de modeller som har utvärderats kan användas för att uppskatta risken för övertändning.

## SUMMARY

This report describes the phenomena of flashover, backdraft and smoke gas explosion, clarifies the physical and the chemical processes involved and discusses how the terms are used internationally.

The type of flame involved when the different phenomena are initiated are thoroughly discussed. It is important to distinguish different kind of flames since they are important in the development of fire. Two types of flames can appear: premixed flames where the fuel and air are mixed before the ignition takes place and diffusion flames where fuel and air are not premixed before the ignition. The flame front of a premixed flame moves with a velocity of several metres per second while for a diffusion flame the process is much slower.

During a compartment fire there can come a stage where the thermal radiation from the fire, the hot gases and the heated walls cause all combustible materials in the fire room to ignite. This sudden and sustained transition of a growing fire to a fully developed fire is called flashover. The flames involved in a flashover are mostly diffusion flames and it is therefore not possible to use limits of flammability in order to describe flashover. Words like lean and rich can not be used to describe flashover since these words are connected to premixed gases.

In a situation where the fire has been poorly ventilated for a long time an accumulation of unburned gases may take place. If an opening is made the inrush of air will mix with the unburned gases. Mainly two factors have an effect on how much of the gases will become premixed: firstly where the ignition source is located, and secondly the period of time from which the opening is made until ignition takes place. Moreover, the size of the opening is of great importance. If the ignition is delayed the major part of the gases may be premixed when the ignition takes place. This could lead to a rapid expansion of the burning gases; a so called backdraft. In a backdraft the gases can to a larger extent be premixed but the flames are normally a combination of premixed and diffusion flames.

In special situations it may be possible for the fire gases to mix well with air before the ignition takes place. This can happen in spaces not far from the fire compartment and consequently an enormous pressure may be built up if the gases are ignited. A smoke gas explosion involves to large extent a premixed process. The size of the pressure build-up depends on how much pressure the different parts of the building can withstand, the size of the leakage areas in the room, and on how much of the gases that are premixed when the ignition takes place.

The three phenomena of flashover, backdraft, and smoke gas explosion are very closely related, and in some cases it may be difficult to distinguish them from one another. A backdraft can lead to flashover. A poorly ventilated fire can result in a backdraft, which sometimes can be called a smoke gas explosion.

The phenomena of flashover, backdraft, and smoke gas explosion have caused casualties and even deaths among the fire rescue personnel. It's therefore of great importance that the personnel is well informed on possible warning signs.

Warning signs must be estimated in relation to the specific situation and the emphasis should not be on one single sign. In order to get a clear view of the of the situation one must consider a number of warning signs.

Unfortunately, the colour of the fire gases is sometimes considered being a certain sign. However, this is actually not a safe warning sign. The colour of the fire gases depend on the type of material on fire.

In the appendices, a number of models which have been used to predict flashover, are evaluated. The evaluation is made using data from small scale experiments, which were carried out within the project. The evaluation shows that some of the models can be used to predict flashover.



## FÖRORD

Jag vill speciellt tacka följande personer för den ovärderliga hjälp som jag erhållit under arbetets gång:

- Björn Karlsson, institutionen för brandteknik, som varit min handledare under projektet.
- Projektarbetarna Anders Edstam och Peter Söderström som hjälpt mig att utföra experiment och en del beräkningar i samband med småskaleförsöken.
- Projektarbetaren Jörgen Carlsson som assisterat vid försök samt hjälp till med CFD- beräkningar.
- Nils Bergström och övrig personal på räddningsskolan i Sandö som gav mig möjlighet att utföra fullskaleförsök.
- Nils Bergström, Magnus Bern, Nils - Åke Carlsson, Sören Lundström, Mats Rosander och Stefan Svensson som utgjorde referensgruppen.
- Sven-Ingvar Granemark, institutionen för brandteknik, som hjälpt mig att utföra experiment.
- Övrig personal på institutionen för brandteknik.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1 Introduktion</b> .....	1-1
1.1 Bakgrund .....	1-1
1.2 Översikt .....	1-2
1.3 Syfte.....	1-3
1.4 Metod .....	1-4
1.5 Begränsningar .....	1-4
1.6 Referenser .....	1-4
<b>2 Allmänt om brandförlopp i rum</b> .....	2-1
2.1 Inverkan av rummets geometri .....	2-3
2.1.1 Inverkan av väggar och tak.....	2-3
2.1.2 Tillgång till syre.....	2-4
2.1.3 Material i omslutande konstruktion.....	2-5
2.2 Brännbart material i rummet .....	2-7
2.2.1 Brännbart material i inredningen.....	2-7
2.2.2 Bränslekonfigurationen i rummet .....	2-7
2.3 Sammanfattning.....	2-8
2.4 Referenser .....	2-9
<b>3 Fysikaliska processer</b> .....	3-1
3.1 Antändning av fasta material .....	3-2
3.2 Ytflamspridning.....	3-8
3.3 Sammanfattning.....	3-12
3.4 Referenser .....	3-13
<b>4 Kemiska processer</b> .....	4-1
4.1 Oförbrända brandgaser .....	4-3
4.1.1 Ekvivalenskvot .....	4-6
4.1.2 Materialegenskaper.....	4-11
4.1.3 Innehåll i oförbrända brandgaser .....	4-13
4.2 Förblandade flammor.....	4-15
4.2.1 Brännbarhetsgränser .....	4-15
4.2.2 Temperaturens inverkan på brännbarhetsgränserna .....	4-20
4.2.3 Brännbarhetsgränser för gasblandningar .....	4-22
4.2.4 Tändenergi.....	4-23
4.2.5 Förbränningshastighet och flamhastighet.....	4-24
4.3 Diffusionsflammar .....	4-28
4.3.1 Grundläggande teori om diffusionsflammar.....	4-28
4.3.2 Gränser för diffusionsflammar .....	4-30

4.4 Tryckuppbyggnad i rum.....	4-34
4.4.1 Skillnaden mellan förblandade och icke förblandade gasmassor .....	4-34
4.4.2 Trycktålighet hos olika byggnadskomponenter.....	4-37
4.4.3 Detonation .....	4-37
4.5 Sammanfattning av begrepp.....	4-39
4.6 Slutsatser.....	4-41
4.7 Referenser .....	4-42
<b>5 Övertändning .....</b>	<b>5-1</b>
5.1 Definition av begreppet övertändning.....	5-3
5.2 En modell för att beskriva övertändning.....	5-5
5.2.1 Effektutveckling .....	5-5
5.2.2 Förbränningshastighet.....	5-8
5.3 Processer i brandgaslagret .....	5-12
5.4 Branden i ”The Stardust Club”, Dublin .....	5-16
5.5 Slutsatser.....	5-18
5.6 Referenser .....	5-19
<b>6 Backdraft.....</b>	<b>6-1</b>
6.1 Definition av fenomenet backdraft .....	6-3
6.2 Ett typiskt backdraft scenario .....	6-5
6.2.1 Tyngdkraftsstyrd strömning (Gravity current).....	6-7
6.2.2 Antändning av den förblandade regionen.....	6-12
6.3 Förhållanden som leder till backdraft.....	6-16
6.4 Branden på ”62 Watts street” .....	6-16
6.5 Slutsatser.....	6-19
6.6 Referenser .....	6-21
<b>7 Brandgasexplosion .....</b>	<b>7-1</b>
7.1 Definition av brandgasexplosion .....	7-2
7.2 Uppkomst av brandgasexplosion.....	7-2
7.3 Faktorer som påverkar hur kraftig en brandgasexplosion blir.....	7-3
7.4 Explosionen på Grand Hotel i Helsingborg .....	7-4
7.5 Slutsatser.....	7-6
7.6 Referenser .....	7-6
<b>8 Backdraft och övertändning - några kännetecken.....</b>	<b>8-1</b>
8.1 Brandgasernas färg .....	8-2
8.2 Kännetecken på en nära förestående backdraft.....	8-3
8.3 Kännetecken på en nära förestående övertändning .....	8-4
8.4 Referenser .....	8-5

<b>9 Praktisk beskrivning av olika scenario</b> .....	9-1
9.1 Försöksbeskrivning.....	9-2
9.2 Stängt rum .....	9-5
9.3 Öppet fönster .....	9-7
9.4 En backdraft situation.....	9-10
9.5 Ventilationens inverkan på brandförloppet .....	9-12
9.6 Brandens pulsation .....	9-14
9.7 Referenser .....	9-15
<b>10 Sammanställning av begrepp</b> .....	10-1
<b>11 Slutsatser</b> .....	11-1
.	
<b>12 Litteraturoversikt</b> .....	12-1
12.1 Tidigare litteraturundersökningar.....	12-1
12.2 Teoretisk beskrivning av fenomenet övertändning.....	12-1
12.3 Mer praktisk beskrivning av fenomenet övertändning.....	12-3
12.4 Beskrivning av fenomenet backdraft .....	12-3
12.5 Referenser .....	12-5
<b>13 Forskningsbehov - och utbildningsbehov</b> .....	13-1
13.1 Framtida forskningsbehov .....	13-2
13.2 Framtida utbildningsbehov .....	13-3

## Appendix

Appendix A: Backdraft container

Appendix B: Experimentella data

Appendix C: Omvandling av mätdata

Appendix D: Beräkningsmetod för antändning av brandgaslagret - Beylers metod.

Appendix E: Beräkningsmetod - Flashover A1

Appendix F: Beräkningsmetod - CFAST

Appendix G: Beräkningsmetod - SOFIE

Appendix H: Beräkningsmetod -MQH- metoden

Appendix I: Småskaleförsök som enbart videofilmades

# 1 INTRODUKTION

## *1.1 Bakgrund*

En brand, som till början är lokalt koncentrerad till ett eller ett fåtal objekt, kan relativt snabbt övergå till ett stadium där allt brännbart material i rummet pyrolyseras. Denna övergång kallas övertändning. Under det tidiga brandförloppet kan många olika situationer uppstå av vilka ett flertal kan innebära stora risker för räddningstjänstens personal.

Det är därför viktigt, både ur risksynpunkt och släcktaktisk synpunkt, att undervisa och informera räddningstjänstpersonal om fenomenet övertändning och andra relaterade begrepp såsom backdraft och brandgasexplosion.

I Sverige har denna undervisning byggts på material /1.1/ där begreppet övertändning innefattar de relaterade fenomenen backdraft och brandgasexplosion. Traditionellt har begreppet övertändning indelats i ett antal huvudtyper och orden fet, mager, varm och kall har använts för att skilja dem åt. Huvudtyperna beskrivs på ett sätt som har varit mycket användbart ur praktisk synpunkt och kan lätt observeras vid försök i container.

Det måste emellertid konstateras att användningen av ordet övertändning i ovanstående utbildningsmaterial inte stämmer överens med den internationellt antagna definitionen av begreppet övertändning; detta har uppmärksammats och den svenska terminologin har ifrågasatts i andra länder. Det är därför av stor vikt att få de svenska begreppen att stämma överens med de internationellt framtagna, att förankra begreppen på en vetenskaplig grund och samtidigt förklara hur fenomenen uppstår i praktiken.

Med anledning av detta gav Statens räddningsverk (SRV) institutionen för brandteknik vid Lunds Tekniska högskola i uppdrag att utreda ovanstående problemområde. Projektet består av tre delar. Del 1 innebar framtagandet av en vetenskaplig rapport där fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion definieras och de geometriska faktorerna samt de fysikaliska och kemiska processerna diskuteras översiktligt. Rapporten heter "Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion" och gavs ut av SRV 1997 /1.2/. Rapporten utredde framför allt den förvirring bland begrepp som rådde och påvisade vetenskapliga brister inom området; med utgångspunkt i detta beslöt Räddningsverket att satsa på en fortsatt utredning inom området.

Del 2 innebar framför allt en djupare beskrivning av de processer som är inblandade i rumsbränder. Teorier bekräftades med hjälp av ett antal experiment, både i småskala och i fullskala. Utredningen mynnade ut i denna rapport som sammanfattar projektet så här långt.

Del 3 består av framtagande av utbildningsmaterial. Denna del utförs i samverkan med utbildningsavdelningen på Räddningsverket i Karlstad. Utbildningsmaterialet beräknas vara färdigt våren 1999.

## **1.2 Översikt**

Det främsta syftet med denna rapport är att ge en allmän beskrivning av fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion samt att diskutera de fysikaliska och kemiska processer som är styrande. Det är viktigt att ha kunskap om dessa processer för att kunna göra en bra släckinsats.

Samtidigt kan det konstateras att de tre fenomenen är nära besläktade och att det i vissa gränsfall kan vara svårt att klart skilja det ena fenomenet från det andra; en backdraft kan resultera i en övertändning, en underventilerad brand kan resultera i en backdraft, vilket möjligen kan kallas för brandgasexplosion o.s.v. Rapporten kommer emellertid att diskutera de tre fenomenen separat, d.v.s. som övertändning, backdraft och brandgasexplosion.

De inledande kapitlen (1, 2, 3 och 4) är av mer grundläggande karaktär och det gäller speciellt kapitel 4 där kemiska processer diskuteras ingående. Kapitel 5, 6, 7 och 8 är av mer deskriptiv karaktär och i kapitel 9 beskrivs några praktiska situationer.

Kapitel 1 ger en introduktion till bakgrunden i projektet. Vidare beskrivs syftet med arbetet.

Kapitel 2 ger en allmän beskrivning av rumsbranden och diskuterar inverkan av geometriska faktorer som rummets väggar, takhöjd och öppningar. Kapitlet beskriver också hur bränslets konfiguration i rummet påverkar brandförloppet.

Kapitel 3 ger en beskrivning av de fysikaliska processer som är inblandade i rumsbranden, framför allt antändning av fasta material och ytflamspridning. Dessa beskrivs endast översiktligt.

Kapitel 4 behandlar de kemiska processer som är styrande för rumsbranden, framför allt förblandade flammor och diffusionsflammor. Vidare diskuteras produktion av oförbrända gaser, där ventilationsförhållandet spelar en avgörande roll.

Kapitel 5 ägnas åt fenomenet övertändning. En definition av begreppet övertändning ges. De fysikaliska och kemiska processer som uppstår diskuteras kvalitativt. En stor del av kapitlet diskuterar de kemiska processer som sker i brandgaslagret strax före övertändning. Kapitlet diskuterar även hur dessa processer har lett till övertändning i ett antal uppmärksammade verkliga fall.

Kapitel 6 ägnas åt fenomenet backdraft. En definition av fenomenet backdraft och en beskrivning av de faktorer som skapar en backdraft ges. I kapitlet beskrivs

också hur antändning av den förblandade regionen sker och hur höga tryck som skapas.

Kapitel 7 behandlar fenomenet brandgasexplosion med tyngdpunkt på i vilka situationer en brandgasexplosion kan uppstå. Kapitlet beskriver också vad som påverkar en brandgasexplosion vad gäller tryckuppbyggnad.

Kapitel 8 ägnas åt möjliga kännetecken på en nära förestående backdraft eller övertändning. Speciellt diskuteras huruvida brandgasernas färg är ett bra kännetecken eller inte.

Kapitel 9 behandlar de vanligaste typsituationerna som kan uppstå. Situationerna är utvalda från fullskaleförsök utförda på Utansjö bruk i november 1997. Händelseförloppen förklaras med hjälp av fotografier och temperaturdata som är hämtade från försöken.

Kapitel 10 utgör en sammanställning av de begrepp som används i rapporten.

Kapitel 11 innehåller de viktigaste slutsatserna från projektet.

Kapitel 12 är en litteraturundersökning inom området. Litteraturöversikten delas in i material av mer teoretisk karaktär och material av mer praktisk karaktär. En stor del behandlar området backdraft, där bl.a. ett doktorsarbete har utförts.

Kapitel 13 innehåller förslag till fortsatt forskning. Speciellt rekommenderas förslag inom området backdraft, där de största riskerna för räddningstjänst-personalen existerar. Kapitlet innehåller också förslag till utbildning inom vissa områden.

Rapporten avslutas med ett antal appendix. I appendix redovisas några modeller som har använts för att uppskatta risken för övertändning. Modellerna har verifierats med hjälp av småskaleförsök utförda vid LTH. Dessa beskrivs också. Appendix innehåller vidare en detaljerad beskrivning av en s.k. "backdraft container".

### **1.3 Syfte**

Det främsta syftet med detta arbete är att ge grundläggande kunskap om de processer som sker under rumsbränder, speciellt vid övergången till den fullt utvecklade rumsbranden men också i situationer då luft introduceras i en syrefattig miljö. Det är viktigt att förstå skillnaden mellan olika fenomen eftersom detta påverkar bedömningen av hur en eventuell släckinsats kan gå till. Rapportens innehåll är till stora delar kvalitativt och den är främst skriven för personal som arbetar inom räddningstjänst, men den bör också intressera andra som vill få en fördjupad kunskap om brandförlopp i byggnader.

## **1.4 Metod**

Arbetet har utförts med hjälp av litteraturundersökning, teoretiska beräkningar och experiment. Litteraturen är dock bristfällig inom flera områden och den är inte alltid praktiskt tillämpbar. För att verifiera några av de processer som beskrivs i rapporten och som är involverade i rumsbranden, har flera försöksserier utförts. Dessa försök har utförts i såväl småskala som fullskala.

Försök i småskala utfördes för att studera vilka olika typer av oförbrända gaser som bildas som funktion av ventilationsöppningen i rummet, samt för att studera den förbränning som uppstår i brandgaslagret. Försöksdata har också använts till att verifiera vissa datormodeller.

Fullskaleförsök utfördes för att studera olika typer av brandförlopp, speciellt övergången till den fullt utvecklade branden. Fullskaleförsöken har videofilmats med hjälp av en specialkamera som placerats inne i brandrummet. På så sätt kan man få detaljerad information om hur brandgaserna antänds. Dessa resultat används bl.a. i kapitel 9 där ett antal försök diskuteras.

## **1.5 Begränsningar**

Utredningen begränsas till själva brandrummet. Konsekvenserna av att flera rum kan vara sammanbundna med varandra utreds inte. Detta är dock en uppgift för framtida forskning. Vidare behandlas inte hur en eventuell släckinsats påverkar brandförloppet, utan händelseförloppet lämnas opåverkat.

## **1.6 Referenser**

- /1.1/ Giselsson, K., Rosander, M. Brandkunskap, Girobrand 1993
- /1.2/ Bengtsson, L-G., Karlsson, B., Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion, Rapport no, P21-185/97, Räddningsverket, Karlstad 1997



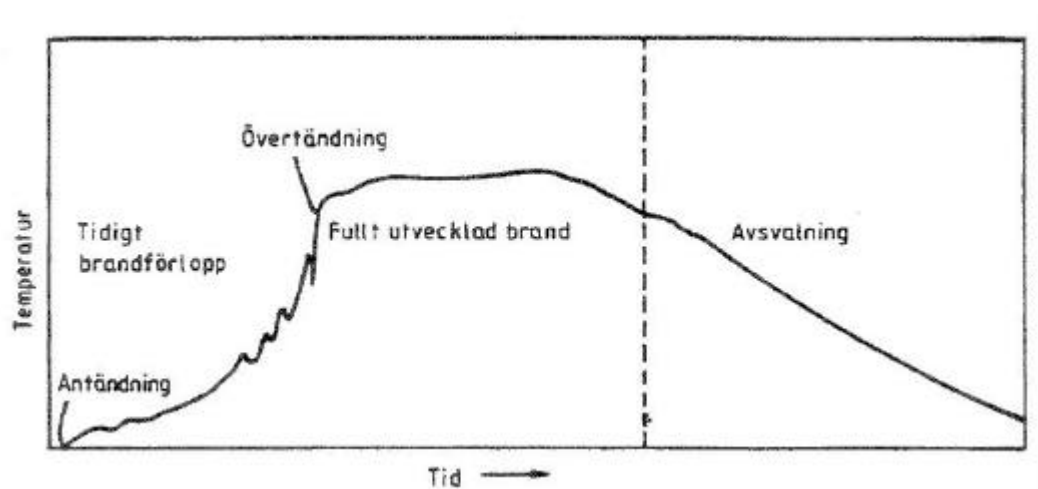
## 2 ALLMÄNT OM BRANDFÖRLOPP I RUM

### *Inledning*

Ett föremål i ett rum, exempelvis en soffa, antänds. En blandning av luft samt oförbrända och förbrända pyrolysgaser stiger mot taket. Beroende på ventilationsförhållandena (tillförsel av luft genom öppningar) i relation till mängden utvecklad brandgas kan en större eller mindre del av gasmassan bilda ett brandgaslager närmast taket. Detta blir allt varmare och avger strålning mot brännbara objekt. Så småningom, när strålningen mot golvet uppnår ca  $20 \text{ kW/m}^2$  /2.1/, kan hela rummet involveras i branden och bli övertänt.  $20 \text{ kW/m}^2$  ligger långt över vad människan tål och utrymningen måste därför vara avslutad långt före övertändningen.

Detta är en mycket enkel beskrivning av ett brandförlopp. Det är dock viktigt att komma ihåg att inte alla bränder utvecklas till övertändning. Det som främst styr brandens utveckling är rummets geometri, tillgången till syre samt typen och mängden bränsle.

Figur 2.1 illustrerar det **fullständiga** brandförloppet i ett **öppet** rum. Om rummet är stängt kommer branden inte att följa det förlopp som visas i figuren. Branden kommer istället att begränsas av den mängd luft som kommer in i rummet.



Figur 2.1, De olika faserna under det fullständiga brandförloppet /2.2/

Tidsperioden från antändning till övertändning kallas det tidiga brandförloppet. Hur snabbt branden utvecklas varierar beroende på vad som brinner och hur bränslet är placerat. Efter övertändning är det främst tillgången till syre, d.v.s. öppningarnas storlek och läge, som styr värmeutvecklingen. Perioden karakteriseras av att temperaturen i rummet ligger på en mer eller mindre konstant nivå och benämns fullt utvecklade brand. Brandgastemperaturer i storleksordning  $800\text{-}900^\circ\text{C}$  är vanliga under den fullt utvecklade branden. Detta skede i brandförloppet är intressant för byggnadsdelarnas bärande och avskiljande förmåga vid brand.

Ur utrymningssynpunkt är den fullt utvecklade branden i ett rum intressant i det fall då den fungerar som brandgas- och värmeproducent för en annan del av byggnaden där utrymning fortfarande pågår. Normalt antar man att utrymningen bör vara avslutad då brandgaserna i den aktuella byggnaden når en temperatur på ca 200°C.

Då allt material i rummet har brunnit en längre tid börjar förbränningshastigheten och därmed värmeutvecklingen att sjunka. Då sjunker temperaturen och avsvlningsfasen inträffar. Denna period varierar kraftigt, och beror bl.a. på hur väl isolerad byggnaden är och vilket material som brinner.

Dessa tre perioder utgör tillsammans det **fullständiga** brandförloppet.

Faktorer som påverkar brandförloppet är bl.a. fysiska faktorer i form av uppbyggnad och rumsgeometri hos byggnaden samt den typ av inredning som finns i de olika rummen. Då en viss brandsituation är beroende av en mängd faktorer som är individuella för den enskilda byggnaden, är det inte relevant att ange ett brandförlopp som representerar en viss byggnadstyp, t.ex. industrier eller publika lokaler. Man kan dock ge exempel på troliga scenarier för en given situation och även peka på trender i brandförloppet utifrån en viss byggnadsstil.

### ***Innehållsförteckning***

2.1 Inverkan av rummets geometri.....	2-3
2.1.1 Inverkan av väggar och tak.....	2-3
2.1.2 Tillgång till syre.....	2-4
2.1.3 Material i omslutande konstruktion .....	2-5
2.2 Brännbart material i rummet .....	2-7
2.2.1 Brännbart material i inredningen.....	2-7
2.2.2 Bränslekonfigurationen i rummet .....	2-7
2.3 Sammanfattning.....	2-8
2.4 Referenser .....	2-9

## **2.1 Inverkan av rummets geometri**

Byggnadens utformning styr brandförloppet genom några viktiga underparametrar, t.ex. närvaron av väggar och tak, öppningar mot det fria och intilliggande utrymmen, omslutande materials termiska egenskaper m.m. Även inverkan av aktiva system, i form av sprinkleranläggning och brandgasventilation, påverkar brandförloppet. Dessa behandlas dock inte vidare här.

### **2.1.1 Inverkan av väggar och tak**

Varma brandgaser som bildas vid en brand når så småningom taket i rummet, vilket gör att ett uppvärmt brandgaslager ansamlas. Dessa brandgaser, som är varma, strålar tillbaka mot det brinnande föremålet och ökar förbränningshastigheten i en omfattning som är påtaglig för lokaler med låg takhöjd och liten golvyta.

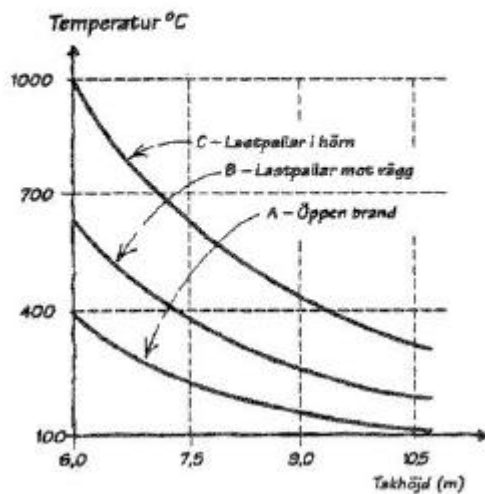
Detta beror på att, när brandgaserna stiger uppåt i en plym, sugas kall luft in, vilket gör att temperaturen sjunker. Denna luftinträngning är beroende av avståndet mellan branden och taket eller avståndet upp till brandgaslagret. Är golvarean begränsad påskyndar detta ansamlingen av brandgaser och brandgaslagrets tjocklek ökar. Strålningspåverkan från brandgaslagret ökar eftersom den beror bl.a. på tjockleken.

I lokaler med stor takhöjd sker visserligen en större luftinblandning i brandgasplymen och brandgasvolymen under taket ökar med större hastighet, medan temperaturen är lägre och därmed också strålningsåterkopplingen till det brinnande föremålet. Mest påtagligt är detta i höga stora lokaler som t.ex. en teatersalong, där brandgasproduktionen visserligen kan vara stor men då konsekvenserna samtidigt blir att brandgaserna kyls ned. Brandgaserna är därför inte farliga för de utrymmande personerna men ändå obehagliga och kvävande vilket kan försvåra utrymningen.

*Återstrålningen kommer att visa sig ha stor betydelse för processen som gör att övertändning kan uppstå*

Det bör tilläggas att i sällsynta fall kommer inte brandgaserna att bilda ett väldefinierat lager, utan istället fördelas jämt i hela lokalen. Den engelska termen för detta är "well-stired".

## TEMPERATUR I BRANDFLYM PLACERING OCH TAKHÖJD



Figur 2.2, Temperaturen i brandflymen vid olika lägen på brandkällan /2.1/

Även brandkällans placeringen i rummet påverkar de varma brandgasernas temperatur. Då branden uppstår nära väggar eller hörn blir flammorna längre och brandgaserna blir varmare på grund av begränsad inblandning av kall luft intill väggen eller hörnet. I figur 2.2 visas hur temperaturen i brandgaserna varierar med takhöjden och brandens lokalisering.

I lokaler med låg takhöjd når dessutom flammen från branden taket i ett tidigare skede. Den breder då ut sig horisontellt under takytan och bidrar kraftigt till strålningsåterkopplingen till brandkällan och ytterligare uppvärmning av brandgaserna under taket. I detta skede av brandförloppet är en s.k. övertändning mycket nära förestående och miljön i rummet är sådan att det är omöjligt att vistas där. Fenomenet övertändning diskuteras i kap 5. Är takytorna dessutom brännbara blir brandtillväxten mycket snabb, vilket diskuteras i kapitel 3. Om flammorna inte når upp till taket får branden ett långsammare förlopp; detta är fallet i lokaler med hög takhöjd och stor golvyta. Brandspridningen i detta fall sker då från ett föremål till ett annat via direkt strålning från flammor och varma brandgaser där avståndet mellan föremålen är av betydelse.

### 2.1.2 Tillgång till syre

För att en flamförbränning överhuvudtaget skall kunna fortgå måste branden tillföras syre. Uteblir detta syre innan den hunnit få stor omfattning kommer branden att självslockna.

Om temperaturen fortfarande är hög i rummet kan dock pyrolysen av bränslet fortgå. Detta kan leda till att det ansamlas mycket oförbrända gaser i rummet. Atmosfären blir bränslerik och luft måste tillföras för att förbränning skall kunna ske. Om en dörr öppnas i detta skede, t.ex. i samband med räddningstjänstens inträngande i lägenheten, kan branden få ett mycket hastigt förlopp. Denna process

kallas backdraft och diskuteras närmare i kapitel 6. En backdraft kan leda till att rummet blir helt övertänt. Brandens effektutveckling begränsas då av öppningens storlek och hur mycket syre som kommer in i rummet. I denna miljö är ingen utrymning längre möjlig. En kvantifiering av hur syret styr effektutvecklingen diskuteras i kapitel 5.

### **2.1.3 Material i omslutande konstruktion**

Det material som finns i omslutande konstruktioner påverkar också temperaturutvecklingen hos de varma brandgaserna och därmed också brandens tillväxt. Vissa material som normalt används för att hålla energiförbrukningen nere, t.ex. mineralull, kommer vid en brand att begränsa värmeflödet genom väggkonstruktionen; detta får till följd att brandgastemperaturen i den övre delen av rummet inte minskar nämnvärt. Dessa material har en låg värmeupptagningsförmåga vilket medför att värmeflödet genom väggar och tak begränsas. Material som har ett högt värmeledningstal, t.ex. tegel och betong, gör att mer värme leds bort och därmed sjunker temperaturen i brandgaslagret.

I kapitel 5 kommer beräkningar att utföras som leder fram till vilken effektutveckling som krävs för att orsaka övertändning i ett rum /2.3/. Denna effekt är framför allt beroende av rummets storlek och öppningsfaktor men också av vilket omslutande material som finns i golv, väggar och tak. Exempelvis kan en soffbrand räcka för att orsaka övertändning i ett specifikt rum där det är mineralull i den omslutande konstruktionen. Om den omslutande konstruktionen istället består av betong kommer inte soffbranden att räcka till för att skapa övertändning i rummet.

Det är inte bara de termiska egenskaperna i väggarna och taket som är av betydelse för brandens utveckling utan också deras förmåga att själva medverka i brandförloppet. Brännbart ytskikt på väggar och/eller tak kan bidra till brandtillväxten och i vissa fall orsaka en mycket snabb brandspridning. Avsnitt 3.2, ytflamspridning, kommer att behandla detta mer utförligt.

För att en brand inte snabbt skall få för stor omfattning och förhindra utrymning ställs krav på ytskikt och beklädnader. Detta måste anses som viktigt, speciellt där materialet monteras på takets undersida eller på de övre delarna av brandrummets väggar. Speciella krav ställs på ytskiktet i utrymningsvägarna. Normalt brukar följande klassbeteckningar användas när det gäller material, beklädnader och ytskikt /2.1/:

- Obrännbart och brännbart material samt svårantändligt material
- Tändskyddande beklädnad
- Ytskikt klass I, II, III

Exempel på obrännbara material är betong och gips. Brännbara material är t.ex. trä och vissa plaster. Svårantändliga material, d.v.s. material som slocknar när tändlågan avlägsnas, är t.ex. vissa plaster.

Med tändskyddande beklädnad menas en beklädnad av obrännbart eller annat för ändamålet lämpligt material, som under minst 10 minuter hindrar bakomliggande brännbara materials antändning.

Exempel på tändskyddande beklädnad är:

- 15 mm cementputs på rörning
- 9 mm gipsskiva

Med ytskikt avses den yttre delen (färg, tapet m.m.) av en byggnadsdel som kan bli utsatt för brandpåverkan i ett tidigt skede av branden. Vid klassificering av ytskikt är det viktigt att bedöma risken för hastig flamspridning och övertändning, liksom hur mycket brandgas som utvecklas. Ytskikt indelas i tre klasser där de högsta kraven ställs för klass I.

Exempel på klass I är:

- normal målningsbehandling på betong
- vanlig papperstapet (175 g/m<sup>2</sup>) på betong

## **2.2 Brännbart material i rummet**

### **2.2.1 Brännbart material i inredningen**

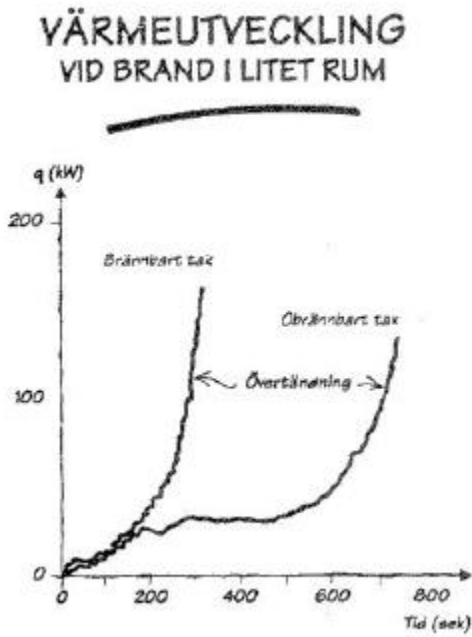
Mängden och typen av brännbart material i den lösa inredningen är självfallet en viktig parameter och styr till stor del brandtillväxten. Mycket i inredningen i form av porösa material och träbaserade material bidrar till snabba brandförlopp. Med inredning menas här allt det som finns i en lokal som inte tillhör själva byggnaden, exempelvis möbler. Om dessa möbler dessutom är stora ytmässigt i förhållande till volymen underlättas brandspridningen. Plastmaterial, t.ex. expanderad polyuretan, som numera är mycket vanligt i möbler, avger förutom värme även en stor mängd sot och toxiska gaser som försvårar utrymningen. Plaster sprider ibland branden mycket snabbt p.g.a. att de droppar och bildar pölbränder på golvet. Branden sprids då mycket snabbt i sidled.

En av de viktigaste brandparametrarna är den som beskriver det brännbara materialet i inredningen. Det är också den parameter som inte regleras i byggreglerna, vilket medför att mycket brännbara inredningsdetaljer kan finnas i t.ex. kontor och bostäder.

### **2.2.2 Bränslekonfigurationen i rummet**

Givetvis är bränslets placering i rummet avgörande för om branden skall utvecklas till övertändning eller inte. I många lägenhetsbränder är det bara ett enda föremål som brinner, dvs branden sprids inte till andra föremål, och konsekvenserna av branden blir därmed ofta lindriga. Om branden istället hade spridits till ett närliggande föremål, t.ex. en bokhylla, hade brandförloppet blivit helt annorlunda. Speciellt om branden ger flammor upp mot taket kommer övertändningsförhållanden enklare att skapas.

En viktig parameter är också om vägg- och takmaterialet är brännbart. Experiment utförda vid Sveriges provnings- och forskningsinstitut, SP, och Lunds tekniska högskola, visar att, när det brännbara materialet är monterat på både väggar och tak, är tiden till övertändning mycket kortare än när materialet endast monteras på väggarna /2.4-5/. Figur 2.3 är hämtad från /2.4/ och visar effektutvecklingen vid försök utförda i mindre skala, där spånskiva var monterad på väggar och tak respektive endast på väggar. Resultatet visar att övertändning i det förra fallet inträffar efter ca 4 minuter, men att när spånskivan endast monteras på väggarna (med obrännbart material i taket) inträffar övertändningen först efter ca 12 minuter.



Figur 2.3, Värmeutvecklingen vid brand i ett rum med brännbart material monterat på väggar och tak respektive endast på väggar /2.1/

### 2.3 Sammanfattning

Byggnadens utformning styr brandförloppet genom några viktiga underparametrar, t.ex. närvaro av väggar och tak, öppningar mot det fria och intilliggande utrymmen, omslutande materials termiska egenskaper m.m. Även inverkan av aktiva system, i form av sprinkler och brandgasventilation, påverkar brandförloppet.

Mängden och typen av brännbart material i den lösa inredningen är självfallet en viktig parameter och styr till stor del brandtillväxten. Mycket i inredningen i form av porösa material och träbaserade material bidrar till snabba brandförlopp.

Givetvis är bränslets placering i rummet avgörande för om branden skall utvecklas till övertändning eller inte. I många lägenhetsbränder är det bara ett enda föremål som brinner. Om vägg- och takmaterialet är brännbart kan brandförloppet i vissa fall gå mycket snabbt.



## **2.4 Referenser**

- /2.1/ Brandskyddslaget, LTH-Brandteknik, Brandskydd, Stockholm 1994
- /2.2/ Ondrus, J., Brandförlopp, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1990
- /2.3/ Karlsson, B., Quintiere J., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /2.4/ Karlsson, B., "Modeling Fire Growth on Combustible Lining Materials in Enclosures", Report TVBB-1009, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1992
- /2.5/ Andersson, B., "Model Scale Compartment Fire Tests With Wall Lining Materials", Report LUTVDG/(TVBB-3041), Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1988

## 3 FYSIKALISKA PROCESSER

### *Inledning*

I förra kapitlet diskuterades hur materialet i rummet påverkar brandförloppet i byggnaden. Givetvis styr placeringen av det brännbara materialet i rummet brandförloppet. I detta kapitel skall de processer granskas som leder till att material kan antändas och sprida en flamma som snabbt bidrar till att kritiska förhållanden uppstår i rummet. Flamspridningen har stor inverkan på tidpunkten då kritiska förhållanden i rummet uppnås.

### *Innehållsförteckning*

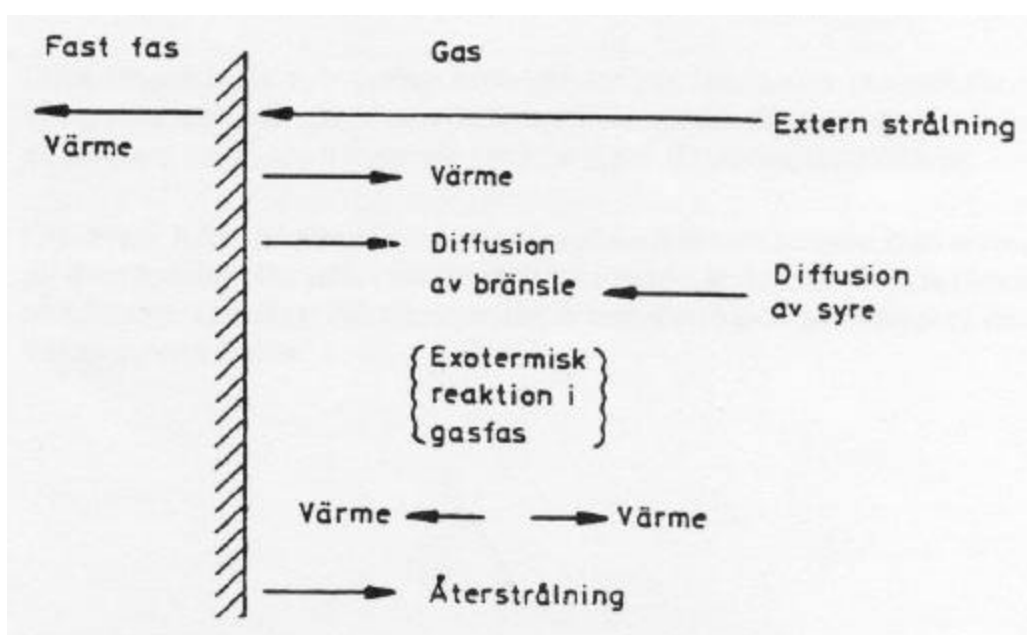
3.1 Antändning av fasta material.....	3-2
3.2 Ytflamspridning.....	3-8
3.3 Sammanfattning.....	3-12
3.4 Referenser.....	3-13

### 3.1 Antändning av fasta material

Antändning hör nära ihop med flamspridning som kan betraktas som en serie antändningar. För fasta material finns en kritisk temperatur vid vilken antändning sker, men denna är i stort sett oberoende av vilket material som brinner och kan därför inte användas som mått på lättantändligheten. Vanligtvis måste ytan hos fasta material värmas upp till 300-400°C för att antändas av en pilotlåga. Om ytan värms upp utan att det finns någon flamma i närheten, måste ytan uppnå 500-600°C (trä) för att antändas /3.1/.

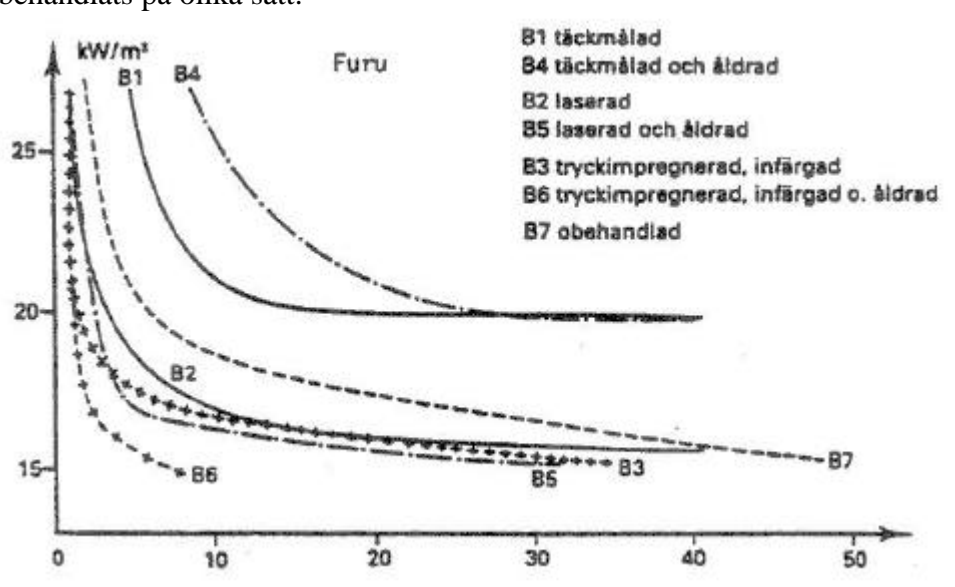
Lättantändligheten hos fasta material uppskattas istället med hjälp av den tid som behövs för att värma upp materialet till antändningstemperaturen. Man talar om tid till antändning. Det är den tid som behövs för att tillräckligt med brännbara gaser skall bildas vid det fasta materialets yta, för att kunna antändas av en liten flamma. Från naturliga material som t.ex. trä eller papper måste ca 2 g/m<sup>2</sup>s brännbara gaser bildas. Från syntetiska polymerer, dvs plaster, räcker det att 1 g/m<sup>2</sup>s brännbara gaser bildas för att de skall kunna antändas /3.1/.

Vid en verklig brand är fasta material utsatta dels för värmen från sin egen flamma, dels för strålningsvärmen från den övriga branden eller det varma gaslagret, s.k. extern strålning. Figur 3.1 visar vad som händer vid bränsleytan då materialet är utsatt för extern strålning. Ytan värms upp, och temperaturen stiger till den nivå som behövs för att materialet skall avge tillräckliga mängder gas för att möjliggöra antändning av gaserna; denna process kräver att den externa strålningen är av en viss storlek. Genom experiment har man bestämt hur mycket värme som behövs för att ett visst material skall kunna antändas vid närvaro av en liten låga. Detta kan mätas med hjälp av en utrustning som kallas konkalorimeter, där materialet placeras under en huv som avger en viss strålning. Ovanpå provet finns en gnistbildare som kontinuerligt försöker antända detsamma. På detta sätt mäts tiden fram till antändningen.



Figur 3.1, Energijämvikt vid en yta /3.1/

Figur 3.2 visar strålningsintensitet ( $\text{kW/m}^2$ ), samt tid till antändning för trä som behandlats på olika sätt:



Figur 3.2 Tid till antändning som funktion av strålning /3.1/

Ur figur 3.2 kan man utläsa att t.ex. täckmålad furu (B1) antänder endast efter mycket lång tid, längre än 30 min om strålningsintensiteten är mindre än  $20 \text{ kW/m}^2$ . Däremot antänder obehandlad furu (B7) vid samma strålning,  $20 \text{ kW/m}^2$ , redan efter 7 minuter.  $20 \text{ kW/m}^2$  strålning motsvarar ungefär den värme som strålar mot golvet i ett rum som närmar sig övertändning.

*Lättantändlighet för fasta material kan alltså uppskattas med hjälp av den tid som en viss värmepåverkan pågår innan antändning kan ske.*

Det fasta materialets ytemperatur kan beräknas med hjälp av den allmänna värmeledningsekvationen, se ekvation 3.1. Det bör observeras att  $h$ , värmeövergångstalet, har försumrats; detta medför en betydlig approximation /3.2/.

$$T_s - T_i = \frac{2\dot{q}''}{p} \frac{t^{0.5}}{(krc)^{0.5}} \quad \text{Ekvation 3.1}$$

- $\dot{q}''$  - tillförd värme  $\text{W/m}^2$
- $T_s$  - temperaturen vid ytan  $^\circ\text{C}$
- $T_i$  - initialtemperatur  $^\circ\text{C}$
- $k$  - värmeledningsförmåga  $\text{W/m } ^\circ\text{C}$
- $r$  - densiteten i  $\text{kg/m}^3$
- $c$  - specifik värmekapacitet i  $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$
- $t$  - tid i sekunder
- $h$  - värmeövergångstal i  $\text{W/m}^2\text{K}$

Om  $h$ , värmeövergångstalet, inte försummas får ekvationen följande utseende /3.2/:

$$T_s - T_0 = \frac{q''}{h} (1 - e^{-h^2 t / k\rho c} \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{h^2 t}{k\rho c}}) \quad \text{Ekvation 3.2}$$

Egenskapskombinationen  $k\rho c$  kallas för materialets värmeupptagningsförmåga.

Värmeupptagningsförmågan avgör hur snabbt materialet värms upp.

$\operatorname{erfc}$  är den komplementära felfunktionen, som gör att ekvationen måste lösas med hjälp av tabellerade värden för funktionen. Mer information om detta finns i /3.2/.

Ytan hos ett material med låg värmeupptagningsförmåga värms upp snabbt, medan detta hos ett material med högt " $k\rho c$ " sker långsamt. Bra exempel på detta är hur man med handen känner skillnaden mellan en träyta och en stålyta som har samma yttemperatur ( $k\rho c$  för stål är ca 800 gånger större än för furuträ). Tabell 3.1 visar skillnaden i  $k\rho c$  för olika material. Observera att värdena varierar med temperaturen.

Tabell 3.1 Värmeupptagningsförmågan för olika material

Material	$k$ (W/mK)	$c$ (J/kgK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k\rho c$ (W <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> )
Spånskiva	0.14	1400	600	120000
Träfiberskiva	0.05	2090	300	32000
Polyuretan	0.034	1400	30	1400
Stål	45	460	7820	160000000
Furuträ	0.14	2850	520	210000

Som exempel kan man jämföra tid till antändning för en spånskiva och en träfiberskiva. Båda materialen påverkas av samma konstanta strålning, 20 kW/m<sup>2</sup>. Spånskivan antänds efter 180 sekunder. Träfiberskivan, som har betydligt lägre  $k\rho c$ , antänds efter betydligt kortare tid, endast 50 sekunder. Proceduren genomförs i konkalorimetern.

Tid till antändning kan också beräknas med ekvation 3.3 som är en omskrivning av ekvation 3.1. Observera att värmemotståndet vid ytan har försummats och att antändningstemperaturen oftast ligger i intervallet 350°C- 400°C.

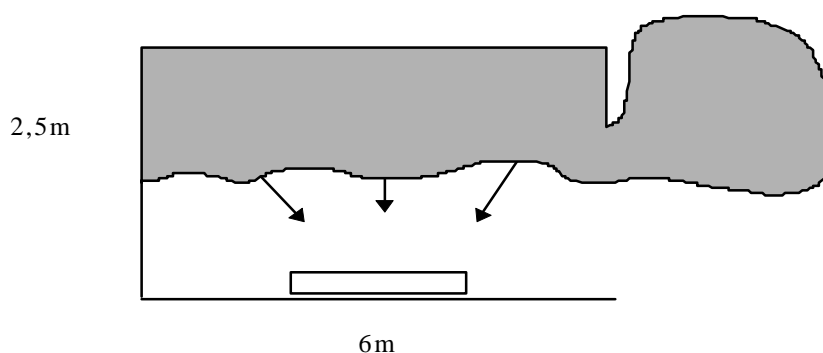
Då antändningstemperaturen,  $T_{sa}$ , är känd, kan tiden till antändning,  $t_a$ , beräknas:

$$t_a = \frac{(T_{sa} - T_i)^2}{4(q'')^2} k\rho c \times \pi \quad \text{Ekvation 3.3}$$

Om man i förväg bestämmer att ytan inte får värmas upp mer än till en viss temperatur kan man beräkna hur lång tid ytan kan utsättas för en viss värme, d.v.s. en viss infallande strålning, innan den uppnår den i förväg bestämda temperaturen.

*Beräkningsexempel: Strålning från ett brandgaslager*

I ett rum bildas ett brandgaslager på grund av en brand. Branden har ännu inte spridit sig i sidled utan producerar ett brandgaslager som håller ca 550°C. Hur lång tid kommer det att ta innan strålningen från det varma brandgaslagret antänder brännbara material i golvnivå, t.ex. möbler? Brandgaslagret kan antas ligga på höjden 1,5 meter.



Figur 3.3, Strålningen från brandgaslagret påverkar bränslets förbränningshastighet

Rummet är 6 meter långt och 2,5 meter högt, d.v.s. brandgaslagret ligger 1,5 meter över golvnivå. Bredden är 4 meter. För att kunna räkna strålningsnivå mot golvet behöver man veta synfaktorn, alltså hur stor del av golvet som brandgaslagret "ser". Synfaktorn för olika konfigurationer mellan den emitterande ytan och den mottagande ytan eller punkten kan beräknas med hjälp av tabeller eller diagram.

Den infallande strålningen kan därefter jämföras med den strålning som antänder föremålet oavsett tid, för att se om föremålet antänds. Därefter används ekvation 3.3 för att beräkna vilken tid som detta tar.

Den emitterade strålningsenergin är mest beroende av den emitterande ytans temperatur. Strålningen från brandgaslagret räknas ut med uttrycket:

$$q = \phi * E \quad \text{Ekvation 3.4}$$

där  $\phi$  är synfaktorn till brandgaslagret och  $E$  är den infallande strålningen.  $E$  räknas ut enligt följande:

$$E = 5,67E-8 * \epsilon * T_f^4 \quad \text{Ekvation 3.5}$$

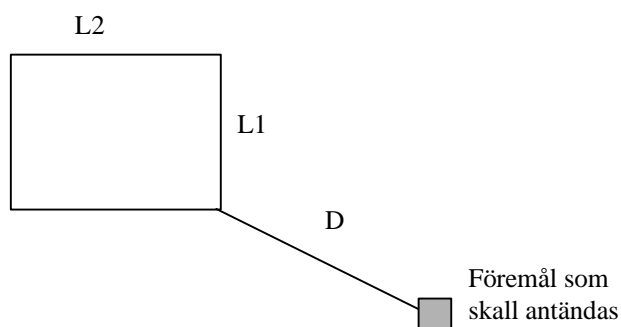
där  $\epsilon$  är emissionstalet, som är beroende av bl.a. sotmängden i /3.4-5/ brandgaslagret och brandgaslagrets tjocklek. Brandgaslagret antas vara en svart kropp och för en svart kropp kan emissionstalet antas vara 1,0.

Detta ger ett maximalt värde på strålningen.  $T_f$  är temperaturen i brandgaslagret.

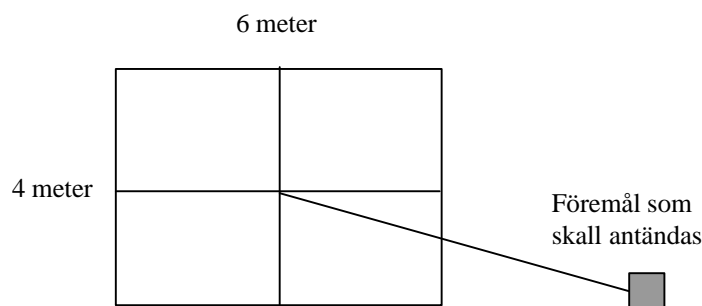
E beräknas till 26,0 kW/m<sup>2</sup>.

Synfaktorn är den del av golvytan som brandgaslagret ”ser”. Den räknas ut med hjälp av golvarean och avståndet mellan brandgaslagret och det brännbara objektet. Vid beräkning av synfaktorn i allmänhet måste hänsyn tas till varje enskild emitterande yta och dess förhållande till mottagarytan. Det geometriska förhållandet mellan den emitterande ytan och den mottagande avgör synfaktorns storlek.

Figuren nedan används /3.3/.



Brandgaslagret delas upp i fyra delar och bidraget från varje enskild del beräknas. Därefter adderas delarna och den totala synfaktorn erhålls.



Ekvationerna nedan är hämtade från /3.3/.

$$S = (L1/L2) \text{ vilket ger } 2/3 = 0,66$$

$\alpha = (L1 * L2) / D^2$  vilket ger  $(2 * 3) / 1,5^2 = \text{drygt } 2$ . Därefter avläses tabell 3.2 vilket ger värdet 0.23. Observera att tabellen inte sträcker sig så långt utan vi måste extrapolera för att få resultatet. Detta multipliceras med 4 vilket ger  $\phi = 0.92$

Tabell 3.2, Tabell som används vid beräkning av synfaktorn

$\alpha$	$S = 1$	$S = 0.9$	$S = 0.8$	$S = 0.7$	$S = 0.6$
2.0	0.178	0.178	0.177	0.175	0.172
1.0	0.139	0.138	0.137	0.136	0.133
0.9	0.134	0.132	0.131	0.130	0.127
0.8	0.125	0.125	0.124	0.122	0.120
0.7	0.117	0.116	0.116	0.115	0.112
0.6	0.107	0.107	0.106	0.105	0.103
0.5	0.097	0.096	0.096	0.095	0.093
0.4	0.084	0.083	0.083	0.082	0.081
0.3	0.069	0.068	0.068	0.068	0.067
0.2	0.051	0.051	0.050	0.050	0.049
0.1	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
0.09	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025
0.08	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
0.07	0.021	0.021	0.021	0.021	0.020
0.06	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018

$q = \phi * E \approx 24 \text{ kW/m}^2$ . Detta värde jämförs med tabell 3.3 /3.3/ nedan:

Tabell 3.3, Observerad effekt vid olika strålningsnivåer

Strålningsnivåer (kW/m <sup>2</sup> )	Observerad effekt
0.67	Solsken i England på sommaren
1	Högsta nivå som inte orsakar smärta
6.4	Smärta efter 8 sekunder
13	Antändning av trä vid närvaro av en liten flamma samt orsak till outhärdlig smärta
20	Kriterium för övertändning
29-30	Trä självantänder

Enligt tabell 3.3 självantänder trä vid strålningen 29 kW/m<sup>2</sup>. Den beräknade strålningen är något lägre. Observera att strålningen i tabell 3.3 är för mycket hårt trä.

Antag nu att det finns en träfiberskiva i golvnivå som har ett  $k\rho c = 32000 \text{ W}^2\text{s/m}^4\text{K}^2$ . Ekvation 3.3 används för att beräkna hur lång tid det tar innan träfiberskivan antänds av strålningen från brandgaslagret.

$$t_a = \frac{(T_{sa} - T_i)^2}{4(q'')^2} k\rho c \times \pi \quad \text{Ekvation 3.3}$$

Efter insättande av värdena i ekvationen erhålls:

$$(350-20)^2/(4*q^2)* 32000*3.14 \approx 5 \text{ sekunder.}$$

**Slutsats:** Vi kan konstatera att rummet mycket snart kommer att bli övertänt.

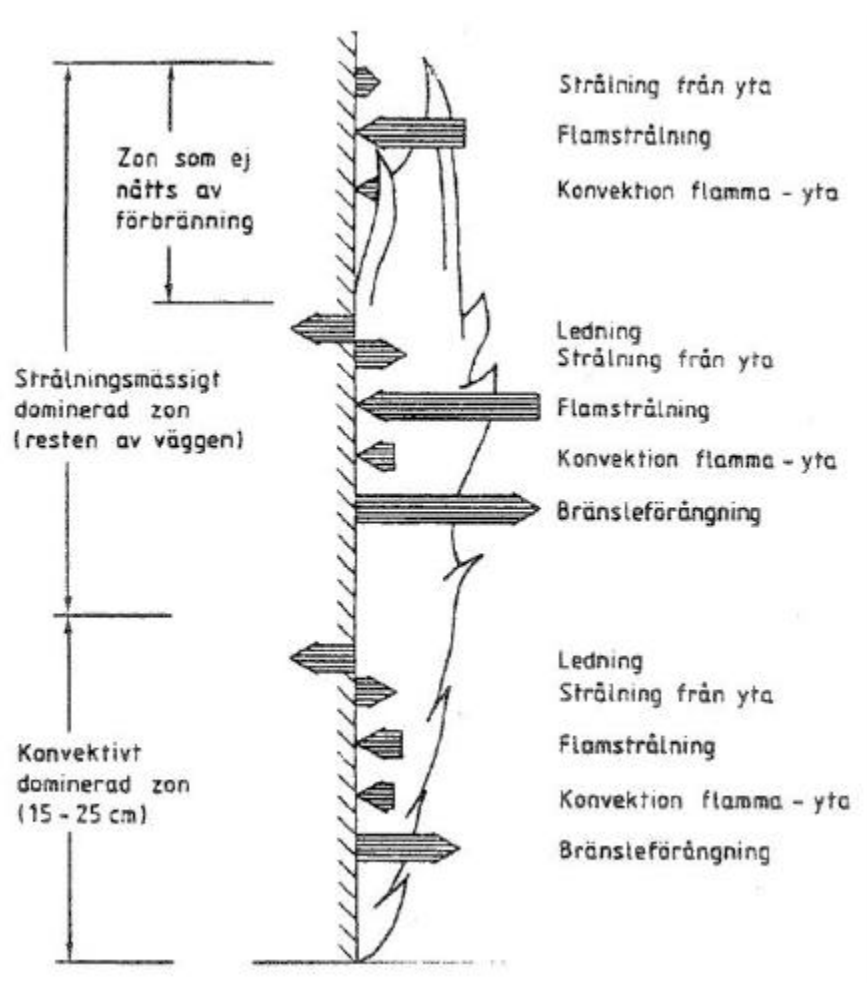


### 3.2 Ytflamspridning

Som tidigare nämnts kommer en snabb flamspridning att starkt bidra till att övertändning kan uppstå. Det är därför en fundamental uppgift att klarlägga vad som påverkar flamspridningen.

Flamspridning kan ses som en serie kontinuerliga antändningshändelser. Eftersom antändningen är starkt beroende av den tidigare nämnda värmeupptagningsförmågan för materialet, blir flamspridningen också beroende av kombinationen av densiteten ( $\rho$ ), den specifika värmekapaciteten ( $c$ ), och värmeledningsförmågan ( $k$ ). Flamspridning är dock mer komplex än så.

Flamspridning vertikalt uppåt är en realistisk förbränningsituation på t.ex. en väggyta som antänts i sin nedre del. Figur 3.4 visar vad som händer vid ytan under en väggbland. Pilarnas längd antyder storleken på de olika komponenterna. Väggen kan indelas i tre zoner. Den nedersta domineras av värmeöverföring från flammans till väggen genom strömning- konvektion. I den mellersta är flamstrålningen den stora andelen vilket beror på att flammans tjocklek ökar med höjden och ju tjockare flammans är, desto större andel av värmeöverföringen sker genom strålning. I den översta zonen har väggen ännu inte antänts.



Figur 3.4, Flamspridning vid vägg /3.1/

Den hastighet med vilken flammen sprider sig över ett materials yta är beroende av:

- materialets värmeupptagningsförmåga,  $k\rho c$
- materialets tjocklek,  $d$
- ytans orientering
- ytans geometri
- den omgivande miljön

### **$k\rho c$**

Flamspridningshastigheten är i hög grad beroende av tiden till antändning som i sin tur är starkt beroende av materialets värmeupptagningsförmåga. Detta kan skrivas som:

$$v \sim \frac{l}{k\rho c} \qquad \text{Ekvation 3.6}$$

Flamspridningshastigheten är alltså omvänt proportionell mot materialegenskapen  $k\rho c$ . Det betyder att ju större värmeupptagningsförmåga ett material har, desto långsammare är flamspridningen vid dess yta. För fasta material ökar oftast värmeledningstalet med ökande densitet; det är därför oftast densiteten som bestämmer hur snabbt flammen sprider sig över ytan. Därför blir flamspridningen över ytan hos ett tungt material i regel lägre än hos ett lätt. Vissa lätta material (ofta cellplaster) sprider flammen extremt snabbt. Detta kan skrivas som:

$$v \sim \frac{l}{r^2} \qquad \text{Ekvation 3.7}$$

Det betyder att ju lättare ett material är, desto snabbare är flamspridningen. Ett cellplastmaterial med densiteten  $100 \text{ kg/m}^3$  sprider flammen vid ytan med en hastighet av  $0.1 \text{ mm/s}$ . För ett material med densiteten  $20 \text{ kg/m}^3$  blir spridningshastigheten  $2.5 \text{ mm/s}$ .

### **Materiallets tjocklek**

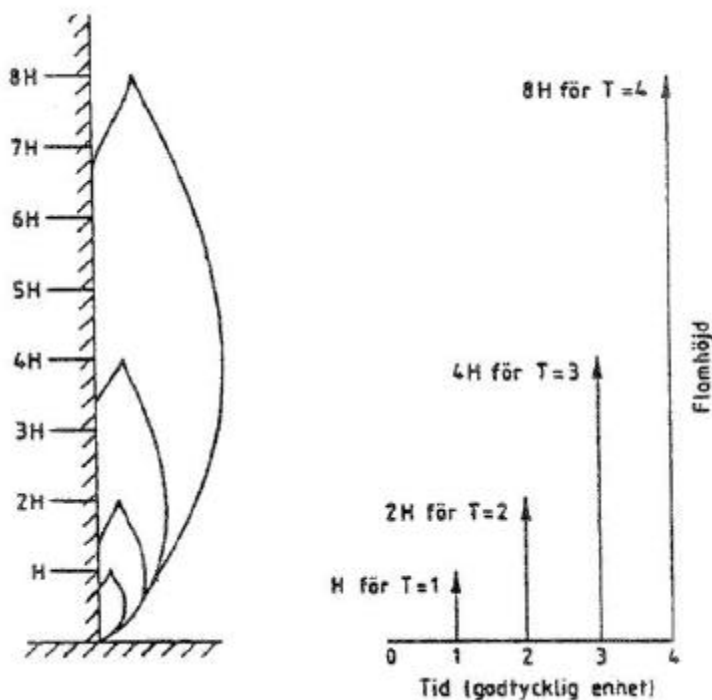
För tunna material (ca  $0.5\text{-}2 \text{ mm}$  tjocklek) som papper eller textil sjunker hastigheten med ökad tjocklek. Vid en viss tjocklek (ca  $10 \text{ mm}$ ) är flamspridningshastigheten vid ytan inte längre beroende av tjockleken.

### **Ytans orientering**

Snabbast sprids flammen vertikalt uppåt. Vertikalt nedåt sker spridningen långsamt. Skillnaden kan bli så mycket som  $50\text{-}100 / 3.1$  gånger snabbare vid

spridning uppåt än nedåt. Däremellan ändras hastigheten beroende på ytans lutning.

För vertikal flamspridning uppåt gäller att flamhöjden för många material blir ungefär dubbelt så stor på samma tid, d.v.s. den s.k. fördubblingstiden är konstant och specifik för ett material. Om en 25 cm hög brand behöver 30 sekunder för att växa till 50 cm, behövs 30 sekunder också för att en 1 m hög brand skall växa till 2 m om väggmaterialet är detsamma /3.1/.



Figur 3.5, Vertikal flamspridning, fördubblingstid /3.1/

Liknande förhållanden gäller för flamspridning på undersidan av en horisontell yta, t.ex. undertak. Flamspridning på översidan av en horisontell yta, eller nedåt en vertikal yta, kan betecknas som krypande och utan den ökning av hastigheten som visas i figur 3.5.

### Ytans geometri

I ett hörn sker en växelverkan mellan de båda brinnande ytorna vilket ger en högre hastighet. Ju mindre vinkeln är desto snabbare blir flamspridningen.

Flamspridningshastigheten uppifrån och ner för en hård plast (plexiglas) i ett inåtgående hörn med 30° vinkel är 0.6 mm/s; när vinkeln är 45° är hastigheten 0.3 mm/s. I en rät vinkel är hastigheten bara 0.12 mm/s. Detta brukar kallas ”skorstenseffekt”.

### Omgivande miljö

När omgivningstemperaturen stiger ökar även flamspridningshastigheten, eftersom ytan är förvärmad och antändningstemperaturen uppnås snabbare. I ekvation 3.8 och 3.9 är  $T_p$  pyrolystemperaturen och  $T_o$  begynnelsestemperaturen.

För tunna material (ca 0,5-2mm) gäller:

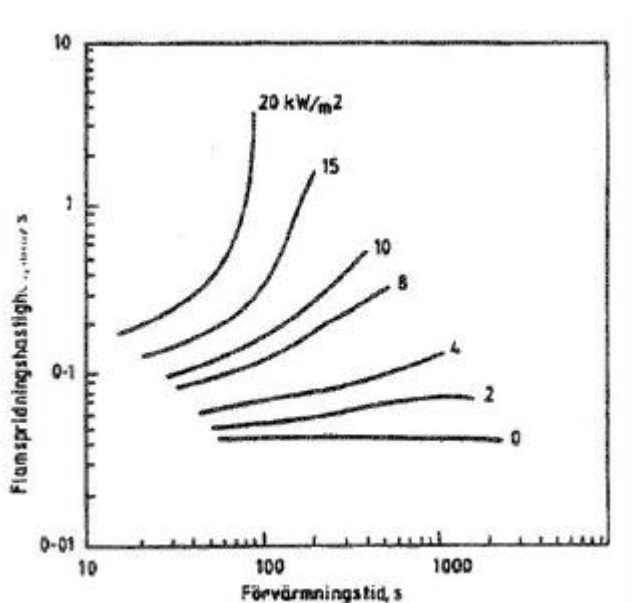
$$v \sim \frac{l}{T_p - T_o} \quad \text{Ekvation 3.8}$$

För tjocka material (>10mm):

$$v \sim \frac{l}{(T_p - T_o)^2} \quad \text{Ekvation 3.9}$$

Detta innebär att ju högre temperatur ett material har från början, desto snabbare uppnås pyrolystemperaturen och därmed antändningen. Eftersom flamspridningen är en serie kontinuerliga antändningshändelser, blir flamspridningshastigheten högre ju högre temperaturen är från start.

Förvärmningen är beroende av den tid strålningen verkar på ytan. Många experiment har genomförts för att bestämma flamspridningshastigheten beroende av uppvärmningen. Figuren 3.6 visar hur denna ändras med uppvärmningstiden för plexiglas.



Figur 3.6, Flamspridningen som funktion av fövärmningstiden

### 3.3 Sammanfattning

Antändning hör nära ihop med flamspridning som kan betraktas som en serie antändningar. För fasta material finns en kritisk temperatur vid vilken antändning sker, men denna är i stort sett oberoende av vilket material som brinner och kan därför inte användas som mått på lättantändligheten. Vanligtvis måste ytan hos fasta material värmas upp till 300-400°C för att antändas av en pilotlåga. Om ytan värms upp utan att det finns någon flamma i närheten, måste ytan uppnå 500-600°C (trä) för att antändas.

Lättantändligheten hos fasta material uppskattas istället med hjälp av den tid som behövs för att värma upp materialet till antändningstemperaturen. Egenskapskombinationen  $k\rho c$  kallas för materialets värmeupptagningsförmåga. Värmeupptagningsförmågan avgör hur snabbt materialet värms upp. Ytan hos ett material med låg värmeupptagningsförmåga värms upp snabbt, hos ett med högt  $k\rho c$  långsamt. Ju lägre  $k\rho c$  ett material har desto kortare blir tiden till antändning.

Det är flamspridningen som avgör i vilken takt energiutvecklingen och produktionen av giftiga gaser sker. Denna hastighet är beroende av ett flertal faktorer, bl.a. materialets värmeupptagningsförmåga, den omgivande miljön och ytans orientering.

För ett material med stor värmeupptagningsförmåga (oftast material med hög densitet) blir flamspridningshastigheten vid dess yta relativt långsam. Därför blir flamspridningen över ytan hos ett tungt material i regel lägre än hos ett lätt.

Om materialet har föruppvärmts av t.ex. en varm omgivande gasmassa, kan materialet uppnå antändningstemperaturen relativt snabbt. Förvärmade ytor orsakar därmed en snabbare flamspridning.

Ytans orientering och den riktning flamman sprider sig i är av mycket stor vikt för flamspridningshastigheten. Det är främst den vertikala, uppåtriktade flamspridningen samt flamspridningen längs undersidan av takmaterialet i ett rum som kan orsaka en snabb, exponentiell brandtillväxt. Uppåtriktad flamspridning, där densitetsskillnaden och luftflödet driver flamman uppåt, gör att flamman från det brinnande materialet föruppvärmer den del av materialet som inte har börjat pyrolyseras. För vissa material leder detta till en exponentiell flamspridningshastighet och värmeutveckling [3.6-7].

Flamspridningen längs undersidan av taket i ett rum beror dels på att luftflödet tvingar flamman framåt, dels på att takytan har föruppvärmts kraftigt av de varma brandgaserna som samlas vid taket. Detta kan, som i fallet ovan, leda till exponentiell brandtillväxt.

Horisontell och nedåtriktad flamspridning på den nedre delen av väggarna i ett rum sker i mycket långsammare takt och blir oftast inte kritisk förrän materialet på den

nedre delen av väggarna värmts upp rejält och branden i rummet närmar sig övertändning. På detta stadium kan dock även horisontell eller nedåtriktad flamspridning orsaka en snabbt ökande värmeutveckling /3.4/.

### **3.4 Referenser**

- /3.1/ Ondrus, J., Brandförlopp, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1990
- /3.2/ "Analytisk lösning av värmeledningsekvationen", Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1990
- /3.3/ Drysdale, D., An introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, Chichester 1985
- /3.4/ Brandskyddslaget, LTH- Brandteknik, Brandskydd, Stockholm 1994
- /3.5/ Karlsson, B., Quintiere J., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /3.6/ Andersson, B., "Model Scale Compartment Fire Tests With Wall Lining Materials", Report LUTVDG/(TVBB-3041), Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1988
- /3.7/ Karlsson, B., "Modeling Fire Growth on Combustible Lining Materials in Enclosures", Report TVBB-1009, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1992

## 4 KEMISKA PROCESSER

### *Inledning*

När rumsbranden växer mot en fullt utvecklad brand sker en rad komplexa processer i brandgaslagret. I vissa fall kan man observera att det sker en antändning av brandgaserna. Huruvida brandgaserna kommer att antändas beror på hur mycket potentiell energi som finns tillgänglig i brandgaslagret, syrenivån i brandgaslagret och om det finns någon tändkälla närvarande. Dessa tre faktorer ingår i *brandtriangeln* och är en förutsättning för att brandgaserna skall kunna brinna.

Om brandgaserna antänds kan det leda till kraftiga flammor och snabba tryckökningar. Flammorna kan ge upphov till brännskador på människor och tryckökningen kan påverka både människor och byggnadskonstruktioner.

Huruvida trycket byggs upp beror till stor del på om brandgaserna är förblandade eller inte när antändning sker. Är brandgaserna förblandade sker en mycket snabb expansion av gaserna. Förbränningshastigheten blir hög och flammen som uppstår kallas förblandad flamma. Om brandgaserna inte är förblandade, d.v.s. om luften och bränslet inte är förblandade innan antändning sker, kallas flammen som uppstår för diffusionsflamma.

Detta kapitel diskuterar de ovannämnda processerna utifrån rena gaser i många fall men diskussionen kan även appliceras på ett verkligt brandgaslager, där bränsleprodukterna härstammar från ett fast material (pyrolys).

För att göra beskrivningen av de fenomen som uppstår enklare, förutsätts det att rummet inte har brännbara ytskikt. I kapitel 5 kommer det att diskuteras vad som händer när ytskikten i brandrummet är brännbara.

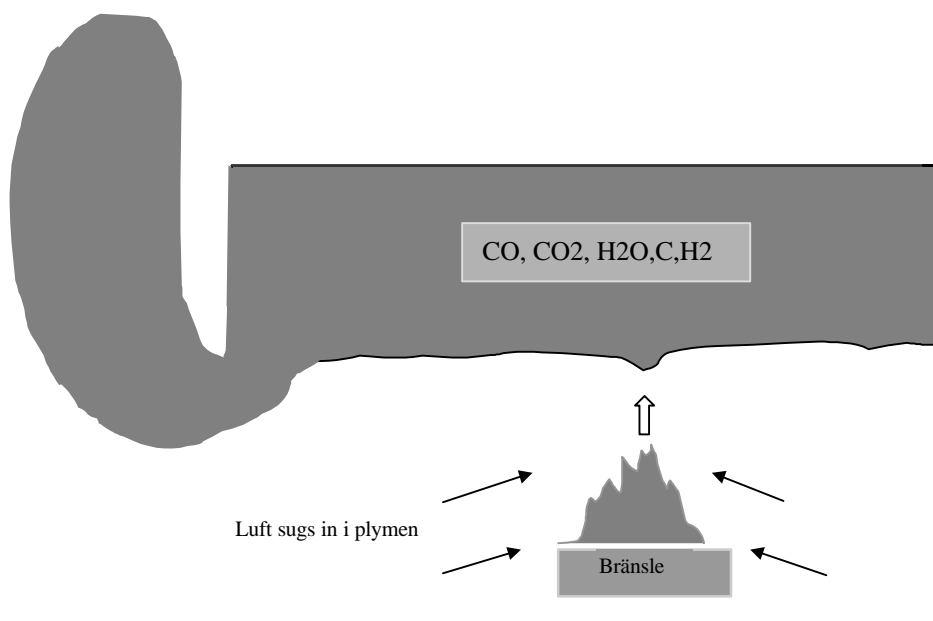
Det är mycket viktigt att förstå hur processerna i brandgaslagret sker för att kunna förutsäga vad som kan inträffa i en verklig situation. Detta kapitel kommer ingående att behandla de processer som kan uppstå i brandgaslagret.

## ***Innehållsförteckning***

4.1	Oförbrända brandgaser .....	4-3
4.1.1	Ekvivalenskvot ( $\phi$ ).....	4-6
4.1.2	Materialegenskaper.....	4-11
4.1.3	Innehåll i oförbrända brandgaser .....	4-13
4.2	Förblandade flammor.....	4-15
4.2.1	Brännbarhetsgränser .....	4-15
4.2.2	Temperaturens inverkan på brännbarhetsgränserna.....	4-20
4.2.3	Brännbarhetsgränser för gasblandningar .....	4-22
4.2.4	Tändenergi .....	4-23
4.2.5	Förbränningshastighet och flamhastighet.....	4-24
4.3	Diffusionsflammar .....	4-28
4.3.1	Grundläggande teori om diffusionsflammar.....	4-28
4.3.2	Gränser för diffusionsflammar.....	4-30
4.4	Tryckuppbyggnad i rum.....	4-34
4.4.1	Skillnaden mellan förblandade och icke förblandade gasmassor.....	4-34
4.4.2	Trycktålighet hos olika byggnadskomponenter.....	4-37
4.4.3	Detonation.....	4-37
4.5	Sammanfattning av begrepp.....	4-39
4.6	Slutsatser.....	4-41
4.7	Referenser .....	4-42



## 4.1 Oförbrända brandgaser



Figur 4.1, Ett rum där det inte finns bränsle på väggar och tak. Initialbranden är belägen på golvet. En mängd olika produkter följer med brandplymen och samlas i brandgaslagret; en del strömmar ut genom öppningen.

När ett fast material värms upp börjar det avge gaser. Denna process kallas pyrolys, och det är dessa pyrolysgaser som brinner. Pyrolys är en kemisk sönderdelning eller annan kemisk omvandling från komplexa till enklare beståndsdelar. En del av de gaser som bildas vid bränsleytan kommer inte att förbrännas av flammen utan kommer att följa med plymen och lagras i brandgaslagret.

Brandgaser som bildas vid en brand består av två komponenter. Den första komponenten, som både vikt- och volymmässigt är den starkt dominerande, utgörs av den luft som sugas eller blandas in i gasströmmen och lämnas opåverkad av kemiska reaktioner. Mängden brandgaser vid en brand är därför i stort sett lika med mängden luft som blandas in i brandplymen, den gasström som för brandgaserna från branden upp i brandgaslagret. Detta förutsätter att det finns öppningar i rummet.

Den andra komponenten innehåller de sönderdelnings- och reaktionsprodukter som bildas vid branden, nämligen gaser (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> m.fl.) och partiklar i fast form (sot) eller vätskeform (exempelvis tyngre kolväteföreningar). En mera noggrann beskrivning av de komponenter som kan bildas vid en brand ges senare i detta kapitel, 4.1.3.

Oförbrända brandgaser bildas alltid om förbränningen sker under otillräcklig syretillförsel. Även om syretillförseln teoretiskt sett är tillräcklig för att förbränna allt bränsle bildas alltid en viss del oförbrända brandgaser.

Förbränningseffektiviteten brukar betecknas  $\chi$  och om  $\chi$  är lika med 1, erhålls den maximala energimängden.

*Produktionen av oförbrända brandgaser är avgörande för om en antändning av brandgaslagret skall kunna inträffa. Om de oförbrända brandgaserna som samlats i brandgaslagret antänds kommer strålningsnivåerna att öka drastiskt i rummet.*

Det är graden av ofullständig förbränning, vilken brukar betecknas med  $1-\chi$ , som avgör hur mycket potentiell energi som kan lämnas oförbrukad i det övre brandgaslagret. Denna energi kan i vissa fall omvandlas till värme och ge en ökning av strålningen i rummet. För plaster kan  $\chi$  vara så lågt som 0.5. Vid förbränning av metanol är  $\chi$  nästan 1.0. Dessa värden gäller för fri tillgång till luft. Om det finns en begränsad mängd luft kommer  $\chi$  att bli lägre.

Det bör observeras att en del av den potentiella energi som finns i brandgaslagret är mycket svår att utvinna, även om brandgaslagret antänds. För t.ex. sotpartiklar krävs att temperaturen uppgår till  $\approx 1000$  °C för att energin skall utvinnas. Det är därför man ofta ser svarta brandgaser strömma ut ur brandrummet, även om temperaturen i rummet är hög. Sotpartiklarna kännetecknas av den svarta färgen.

Effektutvecklingen från en bränsleyta kan beskrivas med ekvation 4.1 /4.1/:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A_f \Delta H_c \chi \quad \text{Ekvation 4.1}$$

där  $\dot{Q}$  - värmeeffekt i W

$\dot{m}''$  - förbränningshastighet i  $\text{kg/m}^2\text{s}$

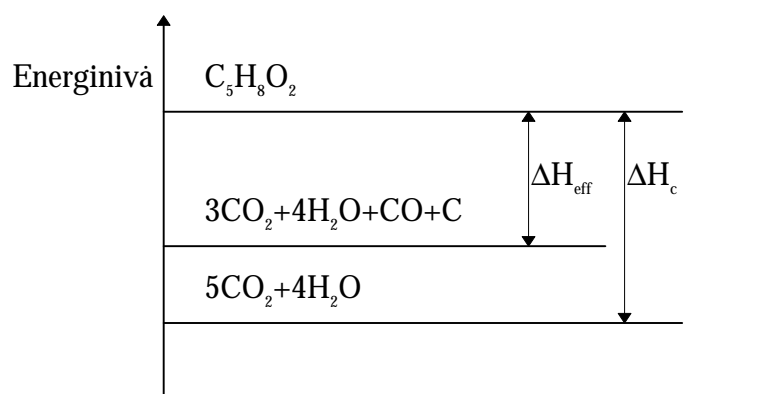
$A_f$  - bränsleytans storlek i  $\text{m}^2$

$\Delta H_c$  - förbränningsvärme vid fullständig förbränning i J/kg

$\chi$  - förbränningseffektivitet som bestämmer hur effektivt bränslet förbrukas

Indirekt visar detta samband hur mycket energi som kan lagras i brandgaslagret.  $1-\chi$  är den del av energin som följer med brandplymen och lagras i brandgaserna.

Figur 4.2 illustrerar ett exempel på ofullständig förbränning av PMMA (plexiglas).  $\Delta H_{\text{eff}}$  är lika med  $\Delta H_c \times \chi$  /4.1/.



Figur 4.2, Förbränning av PMMA (plexiglas) /4.1/

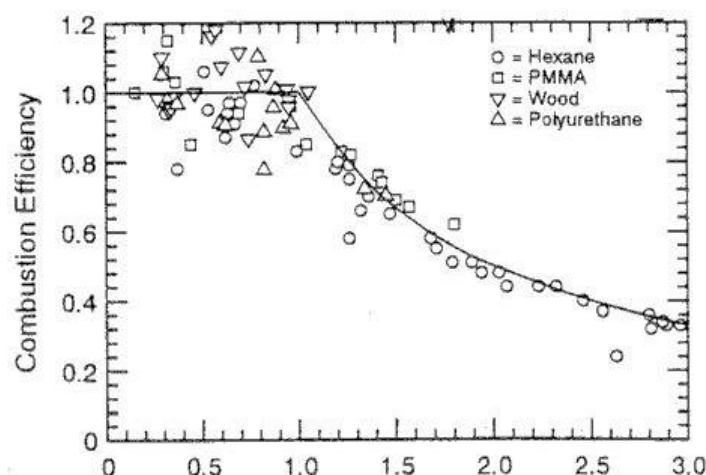
I första reaktionssteget utvinns bara en liten del av energin ( $\Delta H_{\text{eff}}$ ). "Hess lag" /4.2/ säger att delreaktionernas energiutveckling är lika med energiutveckling för fullständig förbränning. Med fullständig förbränning (stökiometrisk förbränning) menas att det bara bildas koldioxid och vatten. För att reaktionen ovan skall ge maximal energiutveckling, ( $\Delta H_c$ ), måste reaktionen gå till sista steget, då det bildas koldioxid och vatten.

Förbränningseffektiviteten ( $\chi$ ) används ofta för att beskriva hur fullständig en förbränning har varit. Ventilationen har stor inverkan på förbränningseffektiviteten. Ju mindre ventilationen är, desto lägre blir förbränningseffektiviteten. Det är därför önskvärt att införa ett begrepp som kan ta hänsyn till hur stora öppningar brandrummet har och på så sätt kvantifiera luftflödet. Detta mått kallas **ekvivalenskvot**.

#### 4.1.1 Ekvivalenskvot ( $\phi$ )

Ventilationen är avgörande för hur mycket oförbrända produkter som kommer att bildas i brandrummet. Beroende på hur stor ventilationsöppningen är kommer en viss mängd oförbrända produkter att bildas. För att kunna kvantifiera mängden oförbrända gaser införs ett mått som beskriver om rummet är välventilerat, vilket innebär att det finns ett överskott av luft, eller underventilerat, vilket innebär att det finns ett överskott av bränsle. Detta mått kallas ekvivalenskvot ( $\phi$ ).

Måttet ekvivalenskvot brukar användas för att uppskatta hur stort luftflödet är i förhållande till vad som krävs för en stökiometrisk förbränning. Det bör påpekas att förbränningseffektiviteten,  $\chi$ , är nära sammanlänkad med ekvivalenskvoten,  $\phi$ , se figur 4.3.



Figur 4.3, Förhållandet mellan ekvivalenskvot ( $x$ -axel) och  $c$  för fyra olika bränslen /4.3/.

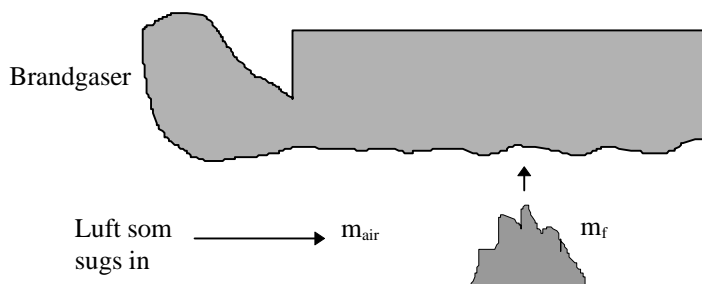
Ekvivalenskvoten definieras enligt följande /4.1/:

$$f = \frac{\left(\frac{m_f}{m_{air}}\right)_{akt}}{\left(\frac{m_f}{m_{air}}\right)_{stök}} \quad \text{Ekvation 4.2}$$

där  $(m_f/m_{air})_{akt}$  är förhållandet mellan bränslet och den luft som kommer in i rummet i den aktuella situationen.

$(m_f/m_{air})_{stök}$  är förhållandet mellan bränsle och luft vid stökiometriska förhållanden.

Det finns olika definitioner på ekvivalenskvoten men i denna rapport används den s.k. globala ekvivalenskvoten /4.4/ för övre lagret, dvs bränslemängden som kommer från initialbranden i förhållande till den massa luft som sugas in i rummet dividerat med det stökiometriska förhållandet. All luft som kommer in i rummet följer med plymen upp i det övre lagret. Detta är givetvis en förenkling. I verkligheten kommer en del luft att gå direkt upp i brandgaslagret.

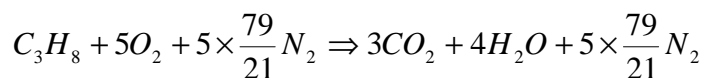


Figur 4.4, Brandplymen för produkterna upp till brandgaslagret

I detta fall är brandrummet förenklat. Bränslet kommer enbart från initialbranden och inte, som i verkliga fall, från t.ex. väggar och tak. För att förtydliga begreppet ekvivalenskvot ges ett enkelt exempel nedan.

Beräkningsexempel: Ekvivalenskvot  $f$

I ett rum brinner en propanflamma. Massförlusten är enligt mätningar 1.35 g/s. Luftflödet in genom öppningen mäts med hjälp av pitotrör. Flödet är 50 g/s. Förhållandena är som i figur 4.4. För att räkna ut ekvivalenskvoten behövs också det stökiometriska förhållandet mellan bränsle/luft. Detta räknas ut med följande ekvation:



Vikt av bränsle:  $12 \cdot 3 + 8 = 44$  g/mol

Vikt av luft:  $5 \cdot 32 + 5 \cdot \frac{79}{21} \cdot 28 = 686$  g/mol

Därefter används ekvationen 4.2

$$f = \frac{\left( \frac{m_f}{m_{air}} \right)_{akt}}{\left( \frac{m_f}{m_{air}} \right)_{stök}}$$

Om värdena ovan sätts in i ekvationen blir resultatet följande:

$$\Rightarrow (1.35/50)/(44/686) = 0.42; \text{ ekvivalenskvoten är alltså under 1.0.}$$

Ekvivalenskvoten ( $\phi$ ) lika med 1 innebär stökiometriska förhållanden, dvs att rummets öppningar är precis så stora att allt bränsle i rummet kan förbrännas.

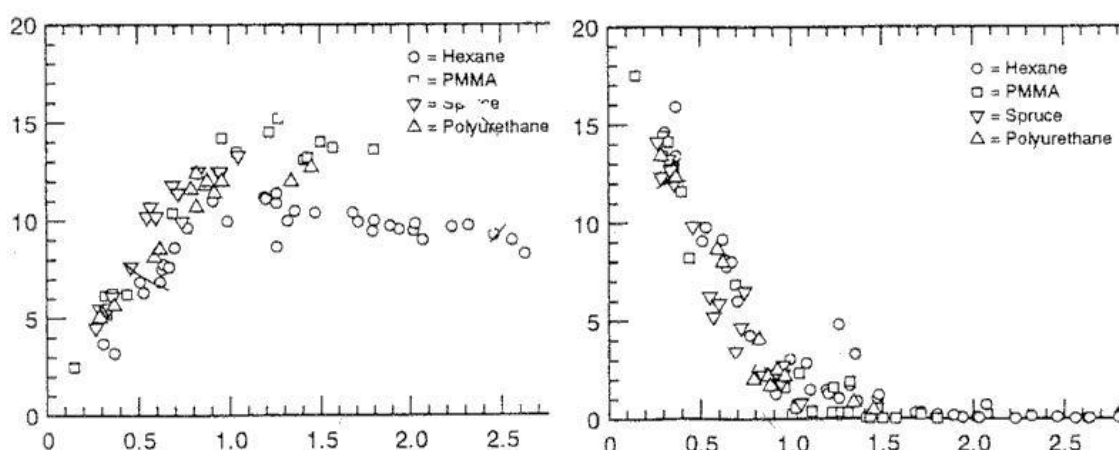
Om  $\phi > 1$  finns det för lite luft för att bränslet skall kunna förbrännas fullständigt och om ekvivalenskvoten är under 1 finns det mer syre än vad som behövs för att förbränna bränslet.

Det är mycket värdefullt att ta reda på hur mycket oförbrända kolväten det finns i brandgaslagret. Med hjälp av detta kan man förutsäga om brandgaslagret kommer att börja brinna eller inte. Det är också mycket intressant att studera CO-halten eftersom höga halter av CO är den vanligaste orsaken till att människor omkommer vid lägenhetsbränder.

Det har visat sig att de produkter som bildas vid rumsbranden kan skrivas som funktioner av ekvivalenskvoten. Amerikanerna Craig Beyler /4.3/ och Daniel Gottuk /4.3/ studerade detta närmare med hjälp av ett antal småskaleförsök. De utförde försök med olika typer av bränslen som var placerade i golvnivå. Både vätskor och fasta material användes. De fasta materialen var sådana som normalt finns i lägenheter, exempelvis trä och plast.

Försöken utfördes i ett litet rum,  $(1.2 \cdot 1.5 \cdot 1.2) \text{m}^3$ , och huvudsyftet var att mäta koncentrationerna av CO, CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub> i brandgaslagret. De konstaterade med hjälp av temperatur- och koncentrationsmätningar att lagret kunde anses vara välblandat; oavsett var i brandgaslagret man mätte var koncentrationen ungefär lika stor av de enskilda gaserna. Det bör påpekas att detta till stor del beror på den speciella försöksupställningen. Den intresserade läsaren hänvisas till /4.3/. De varierade bränslehaltighet och öppningens storlek (indirekt ekvivalenskvoten) samtidigt som de mätte de olika koncentrationerna av de aktuella ämnena. Liknande försök har utförts av författaren. Dessa finns beskrivna i appendix B och C. Bränslet var metan respektive heptan.

Figur 4.5 visar två diagram där CO<sub>2</sub>-halten och halten syrgas (O<sub>2</sub>) ritas som funktioner av ekvivalenskvoten.



Figur 4.5, Koncentrationen CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub> som funktioner av ekvivalenskvoten för fyra olika bränslen. På x-axeln anges ekvivalenskvoten och på y-axeln vol%.

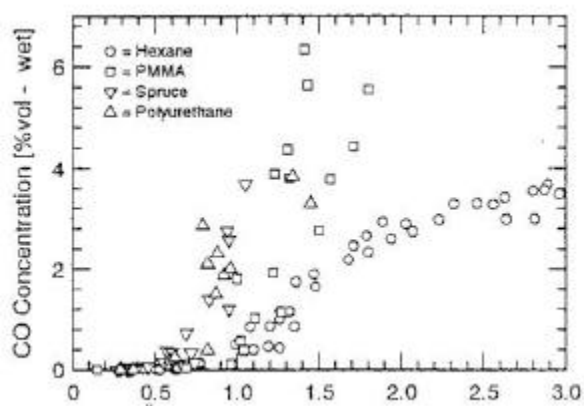
Figur 4.5 visar att syrehalten sjunker med ökad ekvivalenskvot och att koldioxidhalten är störst vid stökiometri.

Sotmängden (C) är direkt proportionell mot siktbarheten i rummet. Det är dock inte lika enkelt att studera hur sotproduktionen är beroende av ekvivalenskvoten. Sotmängden i brandgaslagret är nämligen beroende av "uppehållstiden" och temperaturen i brandgaslagret.

De flesta människor som omkommer i inomhusbränder dör p.g.a. att de inandas CO. Det är därför intressant att skapa sig en uppfattning om CO-halten i brandgaslagret. CO-halten kan variera från 0 % ända upp till 15% under speciella bränsle-konfigurationer och är också starkt temperaturberoende. Att CO-halten är temperaturberoende behandlas ej vidare i denna rapport. CO-halten är kritisk vid 1500 ppm vilket motsvarar 0.15 vol %.

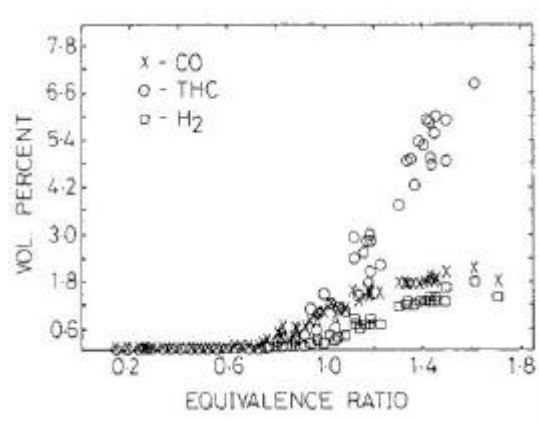
Det är också intressant att studera hur mycket oförbrända kolväten som bildas, för att få en uppfattning om energiinnehållet i brandgaserna. Om energin är tillräcklig kan brandgaslagret användas.

Nedanstående diagram är grundade på experiment. Diagrammen visar att det bildas en del ofullständiga produkter som HC och CO även om  $\phi < 1$ . Om  $\phi > 1$  ökar mängden oförbrända produkter avsevärt. CO<sub>2</sub> och H<sub>2</sub>O är de produkter som bildas vid fullständig förbränning.



Figur 4.6, CO- halten i brandgaslagret som funktion av ekvivalenskvoten, för olika bränslen/4.3/

Det bör poängteras att halten CO kan bli i storleksordning 10 % om taket i rummet är av trämaterial. Med hjälp av Beylers och Gottuks data kan man ställa upp ingenjörsmässiga uttryck för att uppskatta halterna av oförbrända gaser i ett verkligt fall. Det bör också poängteras att ibland presenteras resultaten inte i volymprocent utan i massprocent. Massprocent omvandlas dock relativt enkelt till volymprocent. Detta behandlas dock inte vidare här, för mer information se /4.1/ och /4.3/.



Figur 4.7, Halten av HC produkter i brandgaslagret som funktion av ekvivalenskvoten /4.5/

Figur 4.7 visar att halten THC ("total unburned hydrocarbons") stiger med ökad ekvivalenskvot, vilket beror på att syrehalten är otillräcklig för att förbränna bränslet.

C och CO produceras inte bara i flammen utan också i brandgaslagret. Det är därför svårt att uppskatta dessa enbart med hjälp av ekvivalenskvoten.



#### 4.1.2 Materialegenskaper

Är det då bara de oförbrända gaserna som bildas vid förbränningen som är avgörande för om ett scenario skall bli farligt och växa mot övertändning? Om de oförbrända gaserna antänds kommer strålningsnivån i rummet att öka kraftigt. Plaster nämns ofta som orsak till detta.

Under de senaste decennierna har övergången från träbaserade material till syntetiska polymerer medfört en ny situation på brandskyddsområdet. Vissa egenskaper skiljer sig väsentligt; exempelvis karakteriseras cellplaster av låg värmeledningsförmåga,  $k$ , och låg densitet, se tabell 4.1.

Tabell 4.1, Skillnader i  $krc$  för olika material /4.6/

Material	$k$ (W/mK)	$c$ (J/kgK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k\rho c$ (W <sup>2</sup> s/m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> )
Spånskiva	0.14	1400	600	120000
Träfiberskiva	0.05	2090	300	32000
Polyuretan	0.034	1400	30	1400

Detta medför att cellplaster antänds snabbt och ger upphov till en snabb flamspridning. Detta kan leda till att branden utvecklas till övertändning på mycket kort tid. Snabba övertändningar kan också orsakas av att vissa plaster droppar när de brinner och på så sätt sprider branden mycket snabbt och skapar en hög effektutveckling /4.7/.

*Det är både materialegenskaper och ventilationsförhållanden, d.v.s. produktion av oförbrända gaser, som tillsammans avgör hur brandfarligt ett material är i en viss situation.*

Att jämföra olika material genom att jämföra deras enstaka egenskaper, säger inte allt om deras beteende i en verklig brand. Det är dock värdefullt att känna till de olika egenskaperna och eventuella skillnader mellan olika material.

Trä och cellulosa (papper) är naturliga polymerer. Plaster tillhör en viss grupp av material känd som syntetiska polymerer, d.v.s. organiska substanser (bestående av kol-, väte- och syreatomer) sammanslagna i molekyler med hög molekylär vikt. Denna materialgrupp är stor och mångfaldig, med varierande egenskaper. På samma sätt varierar materialens beteende vid brandpåverkan. Att tala om plasters brandegenskaper i allmänhet är inte särskilt meningsfullt.

Vissa plaster, s.k. termoplaster, mjuknar och smälter vid förhöjd temperatur och beter sig sedan som vätskor. Den strålningsvärme som uppstår vid en brand kan även medföra att plastföremål på relativt stort avstånd från branden kan mjukna eller smälta, utan att direkt delta i branden. Det smälta materialet kan antändas genom strålning från branden i övrigt, genom brinnande droppar eller genom att något brinnande föremål faller ned i det smälta materialet och en vätskebrand uppstår.

Den värmemängd som kan utvecklas vid förbränning ligger för trä mellan 17 och 20 MJ/kg vid fullständig förbränning. För polyetylen (inte så sotig brandgasutveckling) är den 47 MJ/kg, för polystyren (bensenringar som utvecklar kraftig svart brandgas, något som beror på ett högt sotinnehåll) 42 MJ/kg, för polyuretan 24 MJ/kg och för PVC 18 MJ/kg. Detta innebär att stora skillnader förekommer mellan förbränningsvärme för plasterna. Flera termoplaster kan utveckla förbränningsvärme som är jämförbar med eldningsolja.

*Vissa plaster har ett högt energiinnehåll. Beroende på graden av ventilation kan man få en hög grad av ofullständig förbränning. Brandgaserna kommer då att innehålla mycket potentiell energi. Förbränning av plaster kan ofta bidra till de förhållanden som gör att övertändning kan uppstå.*

*Det bör också påpekas att även om brandgaslagret innehåller mycket potentiell energi är det inte säkert att energin kan utvecklas. Vissa ämnen kan bara reagera under särskilda temperaturförhållanden.*

### 4.1.3 Innehåll i oförbrända brandgaser

Syftet med detta kapitel är att beskriva vilka produkter som bildas i samband med bränder. Denna fråga blir intressant när förbränningen är ofullständig; annars bildas bara koldioxid och vatten, vilka i sig inte är brännbara. Nedanstående information är hämtad från /4.7/. Vid praktiska fall bildas det aldrig enbart koldioxid och vatten.

Kolmonoxid, CO, är den vanligast förekommande gasen utöver koldioxid och vatten och oftast den primära dödsorsaken. CO är en färg- och luktlös gas vilket gör att den är svår att upptäcka. Kolmonoxid bildas i stora mängder då takmaterialet består av trä. Halter på 10-15% kan uppnås. Man bör observera att de försök som utfördes av Beyler /4.3/ förutsätter att det inte finns bränsle i taket. Bildning av CO är kraftigt temperaturberoende samtidigt som dess reaktionsbenägenhet starkt varierar inom olika temperaturområden, se /4.3/.

Cyanväte, (HCN), produceras vid ofullständig förbränning av produkter som ull, silke, nylon och polyuretan. Gasen är lätt att förbränna och är ett gift som snabbt leder till kvävningssdöd. Den är färglös.

Kvävedioxid, (NO<sub>2</sub>), och andra oxider av kväve produceras i små kvantiteter från tyger och i större kvantiteter från cellulosanitrat (viskos) och celluloid. Kvävedioxid verkar kraftigt irriterande på lungorna och kan orsaka omedelbart dödsfall eller fördröjd skada. Det är en luktfri gas med en karakteristisk brun färg. Cyanväte och kvävedioxid bildas ofta samtidigt.

Ammoniak, (NH<sub>3</sub>), produceras vid förbränning av ull, silke, nylon och melamin. Koncentrationerna är vanligtvis låga i vanliga bränder i byggnader. Ammoniak har en karakteristisk lukt och orsakar irritation vid låga koncentrationer. Detta leder dock inte till döden. Ammoniak är färglös och bildas sällan i sådana koncentrationer att de är farliga för människan; skulle så vara fallet är det sannolikt att något annat ämne bildats i farligare kvantitet tidigare.

Klorväte, (HCl), bildas vid pyrolys av vissa isoleringsmaterial för ledningar som polyvinylklorid, men även för klorerade akryler och material som behandlats med brandhämmande medel. Klorväte är starkt frätande och inandning kan leda till döden om man inte förflyttar sig från den plats där den bildas. Klorväte är en färglös gas.

Oförbrända kolväten bildas vid förbränning av kolväteföreningar och innehåller CH i olika kombinationer. Dessa är färglösa. Samtidigt som det bildas oförbrända kolväten bildas det också rena kolföreningar, (C), vanligen kallade sot. Sotet består av kolpartiklar som slås ihop, ibland tillsammans med något väte. De är svarta till utseendet och karakteriserar brandgasen. Kolpartiklarna är mycket svåra att utvinna energi ur. Sotet bildas oftast vid underventilerade förhållanden, dvs då  $\phi > 1$ . Glödande sotpartiklar ger flammor dess karakteristiska gula färg.

Man bör notera att inte alla av ovannämnda gaser är brännbara. I kapitel 4.2 och 4.3 diskuteras hur mängden oförbrända gaser avgör om brandgasblandningen är brännbar eller inte.

Beroende på hur väl förblandade brandgaserna är kommer två olika typer av flammor att kunna uppstå. Det är väldigt viktigt att kunna skilja dessa båda åt. De situationer som skulle kunna orsaka att brandgaserna blir förblandade utreds i kapitel 5,6 och 7.

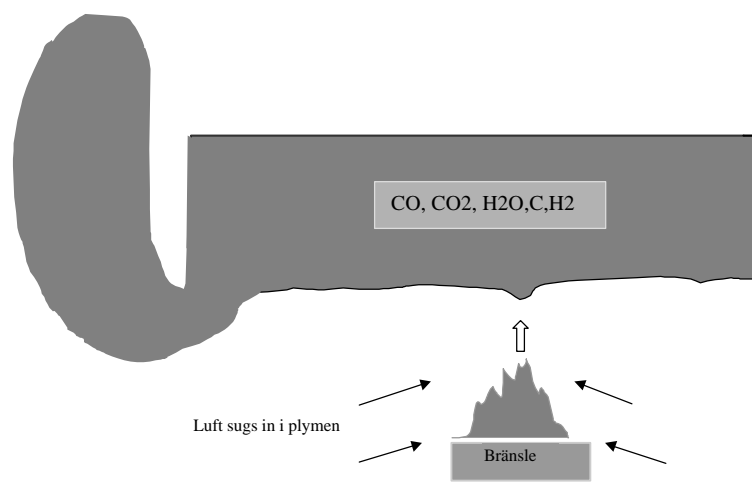
*Om brandgaslagret antänds kommer det att kunna ge upphov till två olika typer av flammor: förblandade flammor och diffusionsflammor.*

## 4.2 Förblandade flammor

Syftet med detta kapitel är att beskriva förblandade flammor. Avsnittet kommer att beskriva bl.a. brännbarhetsgränser och förbränningshastighet.

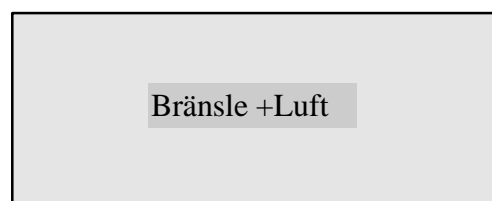
### 4.2.1 Brännbarhetsgränser

Utgångspunkten för diskussionen är ett brandgaslager som är väl förblandat. Med förblandat menas att bränslet är blandat med luft och jämnt fördelat i en större brandgasvolym. Detta brandgaslager kan antändas under vissa förutsättningar.



Figur 4.8, Brandgaserna samlas under taket

Ett brandgaslager innehåller en mängd olika ämnen i gasfas; vissa av dessa kan vara brännbara. För att göra beskrivningen av brännbarhetsgränser enklare diskuteras inledningsvis istället en gasmassa, vilken som helst, som enbart består av bränsle och luft i gasform, se figur 4.9.

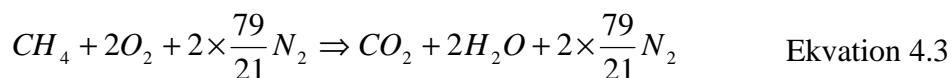


Figur 4.9, Bränsle + luft i någon förblandad proportion

För att en förblandad gasmassa skall kunna brinna krävs att koncentrationen av bränsle ligger inom vissa gränser. Dessa gränser brukar benämnas brännbarhetsgränser. Området mellan den undre brännbarhetsgränsen och den övre brännbarhetsgränsen kallas brännbarhetsområde. Brännbarhetsområdets storlek är ämnesberoende.

Frågan är varför ett ämne bara kan brinna inom vissa gränser. I beskrivningarna nedan används det enkla kolvätet metan. Att metan är en ren gas är betydelselöst. Det kommer senare att visas att det lika gärna skulle kunna röra sig om en blandning av en mängd olika gaser som kan finnas i ett verkligt brandgaslager. Utgångspunkten är en förblandad gasmassa vid rumstemperatur.

I ekvationen nedan förutsätts en stökiometrisk förbränning av gasmassan; det bildas alltså bara koldioxid och vatten. Allt syre används i förbränningen, vilket innebär att det inte finns några fria syremolekyler på högersidan i ekvation 4.3.



Vänsterled                      Högerled  
 Reaktander                      Produkter

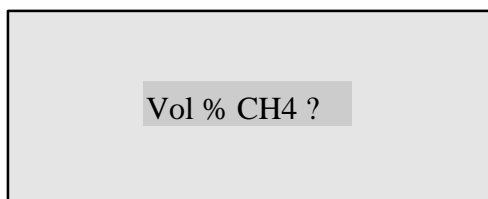
Om blandningen är stökiometrisk blir temperaturen hög. Detta beror på att energin som utvecklas används till att värma upp ett fåtal produkter. Den högsta temperatur som kan uppnås kallas **adiabatisk flamtemperatur** och betecknas  $T_f$ . Då används all energi som utvecklas till att värma upp produkterna.

Tabell 4.2, Materialdata för några olika ämnen /4.2/

Ämne	$\Delta H_c$ (kJ/mol)	$C_p$ (J/kgK)	$T_f$ (K)
Metan	800	81.3	1600
Kolmonoxid	283	33.2	1600
Koldioxid	0	54.3	0
Vatten	0	41.2	0

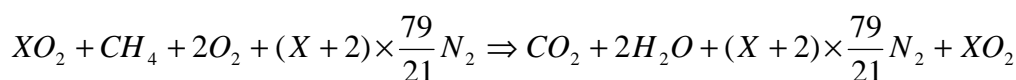
I tabellen är  $T_f$  är den adiabatiska flamtemperaturen vid den undre brännbarhetsgränsen.  $\Delta H_c$  är den energimängd som omvandlas vid förbränning av en mol av bränslet och  $C_p$  är gasens värmekapacitet. Det har visat sig, experimentellt, att produkterna måste uppnå ca 1500-1600 K för att förbränningen skall kunna fortgå. Detta innebär att den adiabatiska flamtemperaturen vid den undre brännbarhetsgränsen är ca 1500-1600 K. Vid stökiometri är den adiabatiska flamtemperaturen ett par hundra grader högre än vid den undre brännbarhetsgränsen. Vid den övre brännbarhetsgränsen har det också visat sig, teoretiskt, att temperaturen skall uppgå till ca 1600 K för att förbränningen skall kunna fortgå /4.2/. Det bör dock tilläggas att den adiabatiska flamtemperaturen är något ämnesberoende; i nedanstående beräkningar tas dock ingen hänsyn till detta.

Det enkla sambandet  $\Delta H_c = \sum C_p * \Delta T$  /4.2/ kan användas för att räkna ut hur många grader ( $\Delta T$ ) en gasmassa med värmekapaciteten  $\sum C_p$  uppvärms, om energin som utvecklas vid reaktionen är  $\Delta H_c$ . Här antas att all energi som utvecklas ( $\Delta H_c$ ) används för att värma upp reaktionsprodukterna. Ingen hänsyn tas till möjliga förluster till omgivningen, och temperaturhöjningen kan därmed sägas vara adiabatisk temperaturhöjning.



Figur 4.10, Hur många vol %  $CH_4$  behövs i blandningen för att den skall kunna antändas?

När man skall beräkna den undre brännbarhetsgränsen utgår man från antagandet att produkternas temperatur måste uppnå 1600 K för att förbränningen skall kunna fortgå. Ekvation 4.4 nedan innehåller ett överskott av luft på båda sidor.



Ekvation 4.4

Ekvation 4.4 är förenklad jämfört med verkliga förhållanden. I själva verket sker ett stort antal reaktionssteg på vägen mot högerledet. Koldioxid och vatten bildas inte förrän i sista reaktionssteget.

Beräkningsexempel: Undre brännbarhetsgränsen

Utgångspunkten är den stökiometriska reaktionen för metan. Ett okänt antal mol syrgas adderas på båda sidor. Den energi som utvecklas kommer att gå åt för att värma upp ett antal extra produkter jämfört med vid stökiometri. X löses ut och andelen metan i blandningen beräknas.

Metan utvecklar 800 KJ/mol och  $C_p$  för de ingående produkterna hämtas från tabell 4.2.

Sambandet  $\Delta H_c = \sum C_p * \Delta T$  används, där  $\Delta T$  är skillnaden mellan den adiabatiska flamtemperaturen och begynnelsestemperaturen. Begynnelsestemperaturen sätts till 300K.

$$\frac{800000}{(1600 - 300)} = 54.3 + 2 \times 41.2 + X \times 34.9 + X \times \frac{79}{21} 32.7 + 2 \times \frac{79}{21} 32.7$$

Ekvationen ger  $X = 1.47$  och med hjälp av detta räknas andelen metan i blandningen ut, alltså antalet mol  $CH_4$  delat med det totala antalet mol reaktander.

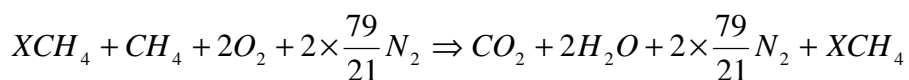
$$\frac{1}{1.47 + 1 + 2 + (1.47 + 2) \frac{79}{21}} = 5.7\%$$

Ekvationen ger att 5.7 % av reaktanderna är metan. Den undre brännbarhetsgränsen för metan är alltså 5.7 % . Detta räknas om till  $g/m^3$  med hjälp av densiteten för metangas. Sambandet blir:

$$\frac{16}{29} \times 1.2 = 0.65 kg / m^3$$

Massan blir då lika med  $0.65 \cdot 0.05 = 35 \text{ g/m}^3$ . Man bör beakta att denna beräkning bygger på utgångstemperaturen 300 K och att den kemiska reaktionen är förenklad. I vissa tabeller /4.2/ bygger data på annan temperatur men framför allt på experiment där den riktiga reaktionsformeln används indirekt.

Samma metodik används för att lösa ut den övre brännbarhetsgränsen. I detta fall finns det ett överskott på bränsle. Det överskott av bränsle som finns måste också värmas upp till ca 1600K. 1600K har teoretiskt visat sig gälla även vid den övre brännbarhetsgränsen. Det extra bränsle som finns kan likställas med en termisk ballast och fungerar egentligen som ett släckmedel /4.8/. Ekvation 4.5 blir i detta fall enligt nedanstående. Det bör tilläggas att reaktionerna är mycket mer komplexa än vad som visas här men för att fokusera på förståelse används det förenklade uttrycket. I verkligheten bildas t.ex. C, CO, C<sub>2</sub> och H<sub>2</sub> /4.9/. I vissa fall genomgår flera hundra delreaktioner för att nå fullständig förbränning.



Ekvation 4.5

Beräkningsexempel: Övre brännbarhetsgränsen

Metan utvecklar 800 KJ/mol och C<sub>p</sub> för de ingående produkterna hämtas från tabell 4.2.

Sambandet  $\Delta H_c = \sum C_p \cdot \Delta T$  används, där  $\Delta T$  är skillnaden mellan den adiabatiska flamtemperaturen och begynnelsestemperaturen. Begynnelsestemperaturen sätts till 300K.

$$\frac{800000}{(1973 - 300)} = 54.3 + 2 \times 41.2 + X \times 34.9 \times 2.33 + 2 \times \frac{79}{21} 32.7$$

Ekvationen ger  $X = 1.17$  och med hjälp av detta räknas andelen metan ut i blandningen.

$$\frac{1.17 + 1}{1.17 + 1 + 2 + (2) \frac{79}{21}} = 18\%$$

Ekvationen ger att 18 % av reaktanderna är metan. 18 % räknas om till ett antal g/m<sup>3</sup> med hjälp av densiteten för metangas. Sambandet blir:

$$\frac{16}{29} \times 1.2 = 0.65 \text{ kg/m}^3$$



Massan blir då lika med  $0.65 \cdot 0.18 = 117 \text{ g/m}^3$ . Man bör beakta att denna beräkning bygger på begynnelsestemperaturen 300 K och att reaktionsformeln är förenklad. I vissa av de tabeller /4.2/ som finns bygger data på annan temperatur men framför allt på experiment där den riktiga reaktionsformeln används indirekt.

Detta förfaringssätt kan användas för att beräkna brännbarhetsgränserna för alla förblandade gaser, oavsett om man har att göra med sönderdelningsprodukter från en verklig brand eller om man har beaktat ett ämne som normalt befinner sig i gasfas.

Tabell 4.3 visar brännbarhetsgränserna för några olika gaser. Det är gasformiga ämnen men principen för brännbarhetsområdet är detsamma oavsett om man beaktar en ren gas eller pyrolysgaserna från ett fast ämne. Värdena är uppmätta från försök; metans värden skiljer sig något från det beräknade i föregående exempel.

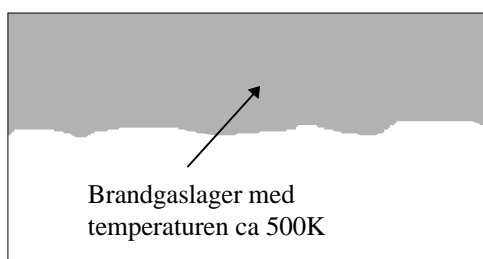
Tabell 4.3 Brännbarhetsgränserna för olika gaser /4.2/. Beräknade värden anges inom parentes.

Gaser	Undre brännbarhetsgräns		Övre brännbarhetsgräns	
	Vol %	g/m <sup>3</sup>	Vol %	g/m <sup>3</sup>
Kolmonoxid	12.5	157	74	932
Vätgas	4.0	3.6	75	67
Metan	5.0	36 (35)	15	126 (117)
Etan	3.0	41	12	190
Propan	2.1	42	9.5	210
Butan	1.8	48	8.4	240
Pentan	1.4	46	7.8	270
Hexan	1.2	47	7.4	310

Som tabellen visar varierar brännbarhetsområdet avsevärt beroende på vilken gas som är aktuell. Beräkningarna stämmer bra med uppmätta värden.

#### 4.2.2 Temperaturen inverkan på brännbarhetsgränserna

I beräkningsexemplet ovan behandlades en gasmassa som från början höll ungefär rumstemperatur. Om man nu istället beaktar ett förblandat brandgaslager som håller en ungefärlig temperatur av 500 K, kommer då brännbarhetsgränserna att förflyttas och varför gör de i så fall det? Hur produkterna har hamnat i brandgaslagret beaktas inte och situationen är därför något idealiserad. Normalt innehåller brandgaslagret inte lika mycket syre som i beräkningarna nedan.



Figur 4.11, Brandgaslager med en temperatur av ca 500K

Om  $f$  är känd kan mängden oförbrända gaser uppskattas genom att man använder Beylers ekvation.

Utgångspunkten är beräkningsexemplet ovan där den undre brännbarhetsgränsen för metan beräknades. Begynnelsestemperaturen,  $T_0$ , byts ut i beräkningarna och ersätts med 500 K. Beräkningar är mycket approximativa men ger en grov uppskattning av temperaturens inverkan på den undre brännbarhetsgränsen.

*Beräkningsexempel: Temperaturen inverkan på undre brännbarhetsgränsen*

Sambandet  $\Delta H_c = \sum C_p * \Delta T$  används, där  $\Delta T$  är skillnaden mellan den adiabatiska flamtemperaturen och begynnelsetemperaturen. Begynnelsestemperaturen sätts till 500K.

$$\frac{800000}{(1600 - 500)} = 54.3 + 2 \times 41.2 + X \times 34.9 + X \times \frac{79}{21} 32.7 + 2 \times \frac{79}{21} 32.7$$

Ekvationen ger  $X = 2.18$  och med hjälp av detta räknas andelen metan ut i blandningen.

$$\frac{1}{2.18 + 1 + 2 + (2.18 + 2) \frac{79}{21}} = 4.8\%$$

Ekvationen ger att 4.8 % av reaktanderna är metan. Detta kan jämföras med den beräknade undre brännbarhetsgränsen från det tidigare exemplet, 5.7%, där begynnelsetemperaturen antogs vara 300K.

Om temperaturen fortsätter att höjas kommer i princip även små mängder bränsle att vara brännbara. Denna beräkningsprocedur upprepades för ett antal temperaturer och tabellen nedan visar hur den undre brännbarhetsgränsen ändrades med temperaturen. Den övre brännbarhetsgränsens temperaturberoende kan räknas ut med samma metod.

Tabell 4.4, Temperaturens inverkan på brännbarhetsgränsen

Temperatur	Undre brännbarhetsgränsen
300 K	5.7%
400 K	5.2%
500 K	4.8%
600 K	4.3%
700 K	3.8%

Den undre brännbarhetsgränsen sjunker med ökad temperatur. Mindre energi behöver tillföras gasmassan för att den skall antända och brinna med flamma.

*Temperaturen är viktig för att man skall kunna uppskatta faran för att brandgaslagret skall kunna antändas i ett verkligt fall.*

Nedanstående ekvation är en förenklad form av beräkningsgången på föregående sida men kan användas för att approximativt beräkna den undre brännbarhetsgränsen. Samma typ av ekvation finns för beräkning av den övre brännbarhetsgränsen.

$$\frac{L_T}{L_{25}} = \frac{T_{\text{lim}} - T}{T_{\text{lim}} - 25} \quad \text{Ekvation 4.6}$$

Här är  $L_{25}$  brännbarhetsgränsen vid 25°C och  $T_{\text{lim}}$  ungefär 1600 K för alkaner, vilket motsvarar den adiabatiska flamtemperaturen vid den undre brännbarhetsgränsen.  $L_T$  är brännbarhetsgränsen vid temperaturen (T) /4.2/.

### 4.2.3 Brännbarhetsgränser för gasblandningar

Hittills har en separat gas diskuterats. I ett brandgaslagret finns dock en mängd olika gaser. Principerna för brännbarhetsgränserna gäller även för gasblandningar. Är innehållet i gasblandningen känt kan brännbarhetsgränsen räknas ut med "Le Chatelier's lag" /4.2/ som ser ut enligt följande:

$$L_m = \frac{100}{\sum_i \frac{P_i}{L_i}} \quad \text{Ekvation 4.7}$$

där  $P_i$  - procent av den enskilda komponenten  
 $L_i$  - den undre brännbarhetsgränsen för den enskilda komponenten

*Beräkningsexempel: Brännbarhetsgränsen för en gasblandning/4.2/*

En gasblandning består av 50 % propan, 40 % butan och 10 % etan.  
 Beräkna gasblandningens undre brännbarhetsgräns.

Ekvationen nedan används och värden på de enskilda komponenternas brännbarhetsgränser hämtas från tabell 4.3.

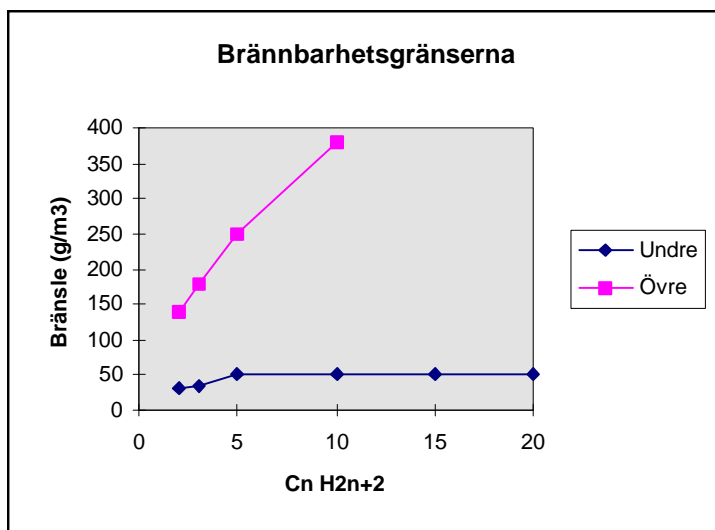
$$L_m = \frac{100}{\sum_i \frac{P_i}{L_i}}$$

vilket ger

$$L_m = \frac{100}{\left(\frac{50}{2.1} + \frac{40}{1.8} + \frac{10}{3.0}\right)} = 2.0\%$$

Det behövs alltså 2.0 % av gasblandningen för att den skall kunna brinna med flamma.

Kolväten är ett specialfall. Mängden bränsle, angiven i  $g/m^3$ , som behövs för antändning av gaserna är nästan oberoende av molekylvikten. Gränsen för metan beräknades tidigare och därmed kan man konstatera att den är något lägre än för tyngre kolväten.



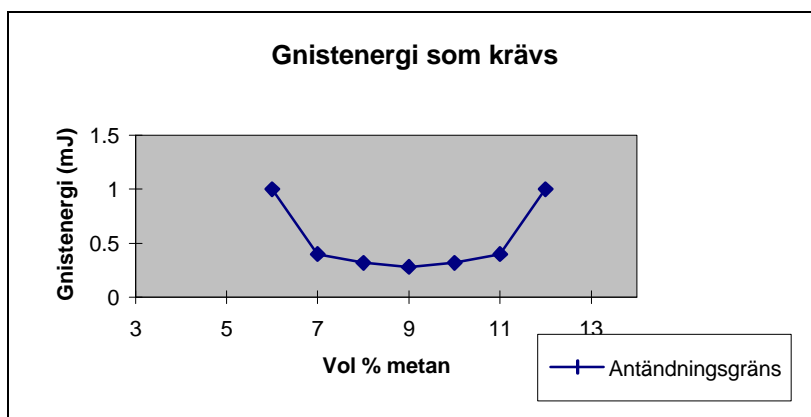
Figur 4.12, Brännbarhetsgränsernas variation med molekylvikten;  $n$  är ett heltal

Den övre gränsen varierar däremot kraftigt med molekylvikten av kolvätet, se figur 4.12. För andra ämnen kan gränserna variera i stor utsträckning. Kolmonoxidens undre brännbarhetsgräns är ca  $160 \text{ g/m}^3$ , se tabell 4.3.

Figuren visar att den undre brännbarhetsgränsen ligger nästan konstant för de flesta kolväten, ca  $50 \text{ g/m}^3$ . Ett brandgaslager innehåller en mängd olika produkter, så det kan inte direkt konstateras att  $50 \text{ g/m}^3$  alltid är ett rimligt värde. Den undre brännbarhetsgränsen kan uppgå till ca  $300\text{-}400 \text{ g/m}^3$  vilket bl.a. beror på halten CO vars undre brännbarhetsgräns är mycket högre.

#### 4.2.4 Tändenergi

Nedan antas att en gasmassa ligger innanför brännbarhetsområdet; luft och bränsle finns således i brännbara proportioner. En tredje komponent, en tändkälla, krävs för att man skall kunna få en antändning. Den energimängd som behövs för att kunna antända gasmassan varierar inom brännbarhetsområdet för metan enligt nedanstående figur, 4.13.



Figur 4.13, Gnistenergi som behövs beroende på koncentration av metan /4.2/.

Vid stökiometri behövs minst energi vilket förklaras med att energin som tillsätts enbart går åt till att värma upp produkterna koldioxid och vatten. Vid den undre brännbarhetsgränsen går energin också åt till att värma upp överskottsluft. Vid den övre brännbarhetsgränsen går energin delvis åt att värma upp överskottsbränsle.

*Det är svårt att uppskatta den kritiska gnistenergin. Generellt kan sägas att gnistor som uppkommer när man trycker på ljusknappen i ett rum eller gnistor från ljusrör är tillräckliga för att tända en gasblandning.*

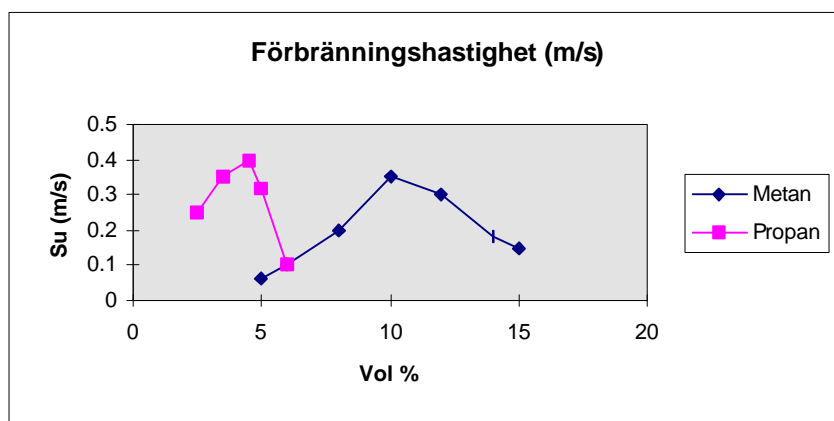
En annan typ av antändning är spontan antändning eller självantändning. Då antänds det brännbara mediet, t.ex. en gasblandning, genom en spontan process. För ett och samma medium är självantändningstemperaturen alltid högre än antändningstemperaturen vid påtvingad antändning. Självantändningstemperaturer är vanliga i storleksordningen 500-600°C [4.8]. Huruvida gaserna självantänder i verkliga situationer är svårt att uppskatta.

#### 4.2.5 Förbränningshastighet och flamhastighet

Under förutsättning att gaserna är förblandade kommer den laminära förbränningshastigheten att variera beroende på var någonstans inom brännbarhetsområdet blandningen befinner sig. Den laminära förbränningshastigheten är den hastighet med vilken den kalla oförbrända gasen rör sig in i flammen.

Om blandningen ligger nära de yttre brännbarhetsgränserna kommer förbränningshastigheten att bli relativt långsam. Ligger blandningen nära stökiometri sker förbränningen snabbare p.g.a. att mer energi frigörs. Det är dock inte så att förbränningshastigheten kommer att öka ju fler procent bränsle som finns i gasmassan utan den når sitt toppvärde vid stökiometri och sjunker sedan ner mot den övre brännbarhetsgränsen.

Figur 4.14 anger den laminära förbränningshastigheten för metan respektive propan. Dessa skiljer sig åt en hel del.



Figur 4.14, Förbränningshastighetens variation med ämne och bränsle uppskattat i vol %.

Den laminära förbränningshastigheten kan beräknas med hjälp av följande samband /4.2/:

$$S_u = \left( \frac{2k}{\rho_0^2 \times C_p^2 \times (T_f - T_0)} \times Q_{ave} \right)^{0.5} \quad \text{Ekvation 4.8}$$

där  $Q_{ave}$  - den energi som utvecklas per volymsenhet ( $\text{W/m}^3$ )

$T_0$  - rumstemperaturen (K)

$T_f$  - flamtemperaturen (K)

$k$  - gasblandningens värmeledningsförmåga ( $\text{W/mK}$ )

$C_p$  - gasblandningens värmekapacitet ( $\text{J/kgK}$ )

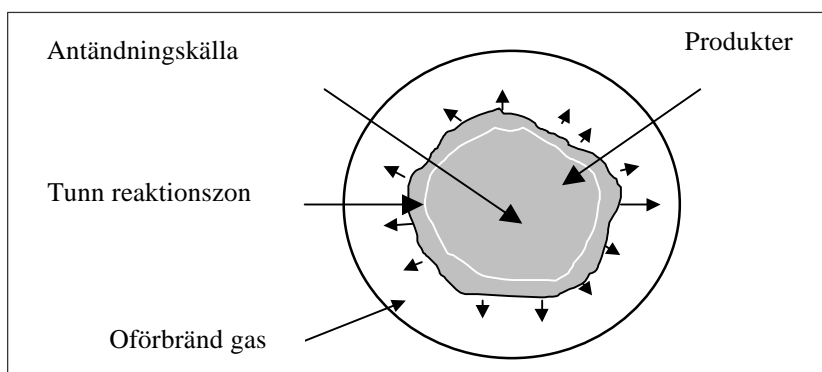
$\rho$  - gasblandningens densitet ( $\text{kg/m}^3$ )

Vid jämförelse av en blandning av metan vid den undre brännbarhetsgränsen och en blandning vid stökiometri så utvecklas det mer energi vid den senare än vid den förra, vilket enligt ekvationen ger ett större värde på  $S_u$ , se diagram 4.14. Vid den övre gränsen utvecklas det inte lika mycket energi som vid stökiometri, vilket beror på att det finns mindre syre tillgängligt.

*Ju mer energirika gaserna är desto snabbare förbränningshastighet får de.  $S_u$  är proportionell mot energiutvecklingen.*

Exempelvis har vissa plaster ett högt energivärde vilket gör att brandgaserna kan innehålla mycket energi om förbränningen sker under underventilerade förhållanden. När brandgaserna sedan antänds kommer förbränningen att få ett hastigt förlopp. Detta har diskuterats i föregående avsnitt.

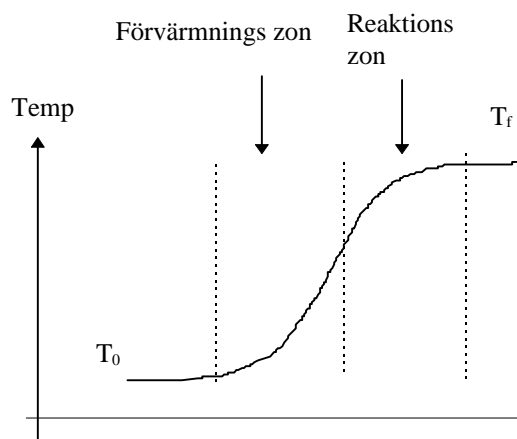
Nedanstående figur är hämtad från /4.10/:



Figur 4.15 , Flamutbredning i en förblandad gasmassa/4.10/

Den hastighet med vilken den tunna reaktionszonen, eller flamfronten, som visas i ovanstående figur färdas genom en gasmassa kallas flamhastighet. Denna uppskattas med utgångspunkt från en fix punkt, t.ex. antändningskällan i figuren ovan. Flamhastigheten är relaterad till den laminära förbränningshastigheten  $S_u$ . I

praktiken är flamhastighet och laminär förbränningshastighet **aldrig** samma sak. Vid förbränning trycks flamfronten framåt p.g.a. den expansion av varma gaser som sker och produkterna värms upp bakom reaktionszonen, se figur 4.16. De varma produkterna kan inte expandera fritt utan är instängda bakom flamfronten.



Figur 4.16, Förstoring av den tunna reaktionszonen i figur 4.15

Sambandet mellan  $S_f$ , flamfrontshastigheten, och den laminära förbränningshastigheten,  $S_u$ , kan visas mycket förenklat. Flamfronten utbreder sig sfäriskt och de varma förbränningsgaserna bakom flamfronten kan inte expandera fritt. Flödet antas vara laminärt vilket ger följande enkla samband:

$$S_f = S_u * E \quad (\text{m/s}) \quad \text{Ekvation 4.9}$$

där  $E$  är expansionsfaktorn.

Expansionsfaktorn kan härledas genom att man studerar hur mycket volymen ökar efter förbränningszonen. Den ges av sambandet:

$$E = (T_f/T_i)(N_b/N_u) \quad \text{Ekvation 4.10}$$

där  $T_f$  - temperaturen av produkterna

$T_i$  - ursprungstemperaturen av de oförbrända gaserna

$N_b$  - summan av de produkter som finns efter reaktionen

$N_u$  - summan av de reaktanter som finns före reaktionen

$N_b/N_u$  varierar för många gaser men i de flesta fall ligger kvoten runt 1. Vi kan därför anta att



$$S_f = S_u * (T_f/T_a)$$

Om turbulens påverkar systemet måste  $S_u$  ökas med en faktor  $\beta$ . Denna leder till att  $S_f$  blir ännu högre. Det bör tilläggas att  $T_f$  är störst vid stökiometriska förhållanden. Detta medför att expansionsfaktorn är störst vid stökiometri, upp till ca 8, medan den kan sjunka till 5-6 vid brännbarhetsgränserna.

Den förbränning i en förblandad gasmassa som hittills har diskuterats kallas deflagration. Vid en deflagration är flamhastigheten begränsad av transportprocesser, framför allt värme och massa.

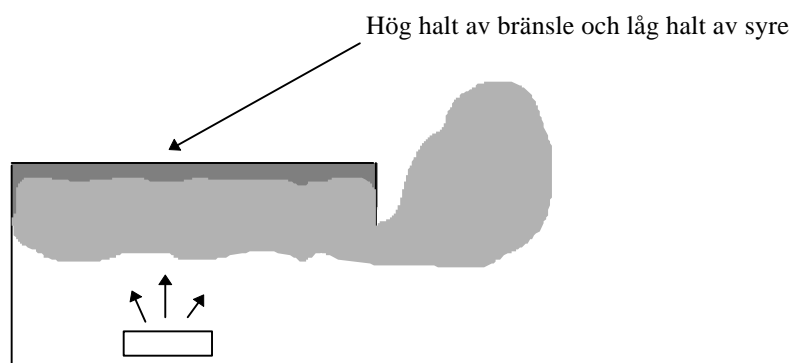
*I brandsammanhang används ofta begrepp som mager och fet för att beskriva ett brandgaslagrets sammansättning. Man skall beakta att dessa begrepp förutsätter att gasmassan verkligen är förblandad.*

*I de flesta inomhusbränder är brandgaserna inte väl förblandade utan en s.k. diffusionsflamma kommer att sprida sig i brandgaslagret. Termerna mager och fet kan alltså inte användas i dessa sammanhang.*

### 4.3 Diffusionsflammor

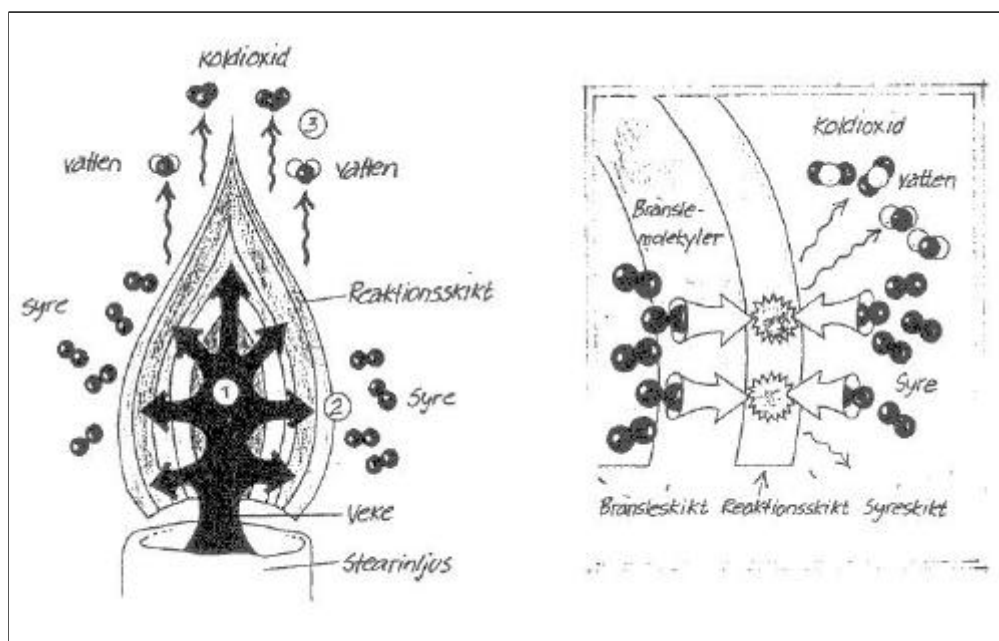
#### 4.3.1 Grundläggande teori om diffusionsflammor

Vid brand i ett rum uppstår i många fall ett brandgaslager som inte är homogent. Detta kan t.ex. beror på att det skett en kraftig pyrolys av takmaterialet. Syrehalten blir då mycket låg precis under taket. Koncentrationen av bränsle blir inte jämnt fördelad i hela brandgaslagret. Syret måste då diffundera in i bränslet för att förbränning skall kunna uppstå, se figur nedan 4.17.



Figur 4.17, Ett icke förblandat brandgaslager, där det mörka området symboliserar en högre halt av bränsle. Det kan t.ex. bero på att takmaterialet är brännbart.

Stearinljuset är ett enkelt exempel på diffusionsflamma. Nedanstående bild är hämtad från /4.8/.



Figur 4.18, Stearinljus, bränsle och syrerika skikt /4.8/

Det brinnande stearinljuset kan förklara både grundläggande förbränningsprinciper och flammans struktur. Bränslet utgörs av det flytande smälta stearinet i stearinljusets lilla pöl. Det sugs upp i veken och förångas.

Värmen från stearinljusets flamma räcker för att smälta stearinet, men inte för att förånga det. Stearinet måste därför förflyttas genom veken till flamområdet, där temperaturen är högre och det kan förångas. Vekens storlek reglerar mängden bränsle. Det förångade bränslet samlas sedan kring veken. I mitten av stearinljusets flamma bryts de komplexa kolväten som stearinet består av ner till enklare beståndsdelar. Gasen cirkulerar sedan i mittområdet innan det når förbränningszonen (reaktionsskiktet).

Bränslegasmolekylerna når ut till ytan av mittområdet, d.v.s. till reaktionsskiktet. Där blandas de med syremolekyler från den omgivande luften.

*Denna förflyttning kallas diffusion och innebär ett transportförlopp där två eller flera gaser blandas*

När gaserna har fått en viss proportion till varandra och är tillräckligt varma för att antända sker en exoterm kemisk reaktion. Då avges värme vilket resulterar i en flamma. Gasblandningen förbränns. Syret och bränslet fortsätter diffusionsprocessen mot reaktionsskiktet och en kontinuerlig diffusionsflamma uppstår.

Den synliga lysande delen av flaman är värmestrålning från glödande sotpartiklar. Vid oxidationen i reaktionszonen bildas koloxider (koldioxid och kolmonoxid), vatten och värme. Koloxider och vatten, som har producerats i reaktionsskiktet, avges till omgivningen i form av ånga. Den inre delen av flaman som är fylld med bränslegas innehåller för lite syre för att förbränning skall kunna äga rum. Blandningens koncentration är hög. Förbränning sker bara i periferin där bränslegas och syre har diffunderat in i varandra. I reaktionsskiktet är de sammanblandade i rätt proportion till varandra. Alla naturliga flammor är egentligen diffusionsflammor; de är beroende av diffusionen.

*Dessa flammor utmärker sig igenom att förbränningen sker med ungefär samma hastighet som bränslegas och syre från luften diffunderar i varandra.*

En diffusionsflamma är resultatet av en förbränningsprocess där bränslegas blandas med syre genom laminär och/eller turbulent inblandning. Då uppstår laminära respektive turbulenta diffusionsflammor.

### **Laminära diffusionsflammor**

Flamman från ett stearinljus är en typisk diffusionsflamma där bränslegas och syre från luften strömmar jämsides med varandra med ungefär samma låga hastighet. Sammanblandningen sker laminärt (jämsides) och förbränningen i reaktionsskiktet blir jämn. Om diffusionen sker långsamt, behöver syret och bränslet blandas under en längre sträcka för att kunna brinna. Förbränningen sker då högre upp i flaman och flaman blir längre. Detta är viktigt att veta för att förstå brandspridning i

byggnader. En brännbar blandning av bränslegas och syre kan uppstå och antända långt från den ursprungliga brandkällan.

### **Turbulenta diffusionsflammar**

Om hastigheten på den utströmmande bränslegasen blir högre än inblandningen av syre från luften sker sammanblandningen i virvlar. Det kallas för turbulent inblandning. Inblandningen av syre sker även här genom diffusion, men förbränningen blir ojämn och oregelbunden. Strukturen hos en turbulent diffusionsflamma är inte symmetrisk. Den är beroende av gasblandningens sammansättning, som i sin tur är beroende av den beskrivna diffusionsprocessen.

Turbulenta flammar karakteriseras av

- oregelbunden virvelrörelse
- snabb diffusion
- snabb omflyttning av innehållet
- tunt och oregelbundet reaktionsskikt

Turbulenta flammar åtföljs, till skillnad från laminära, ofta av ljud och snabba förändringar i utseendet. Turbulensen kan ske i alla gasformiga media. Vid de flesta bränder utgörs flammorna av turbulenta diffusionsflammar.

### **4.3.2 Gränser för diffusionsflammar**

*Diffusionsflamma uppstår i gränsskiktet mellan bränsle och luft. Man kan därför inte använda brännbarhetsgränser, begrepp som mager och fet eller koncept rörande förbränningshastighet för att beskriva en diffusionsflamma.*

Diffusionsflamman kan givetvis vara mer eller mindre energirik beroende på innehåll.

Craig Beyler /4.11/ har utvecklat en modell som bygger på att en diffusionsflamma utvecklas i det brinnande brandgaslagret. Teorin bygger framför allt på ekvivalenskvoten  $\phi$  och temperaturen i brandgaslagret. Med hjälp av dessa kunde Beyler ta fram en modell som uppskattar om brandgaslagret kommer att antändas eller inte. Beylers ekvation ges i förenklad form nedan.

Modellen /4.11/ bygger på det empiriska samband som finns mellan brännbarhetsgränser för förblandade flammar och brännbarhetsgränser för diffusionsflammar. Arbetet bygger på undersökningar av diffusionsflammar utförda av Simmons och Wolfhard /12/. De fann ett samband mellan en diffusionsflammas "Limiting Oxygen Index" (LOI) för ett visst bränsle, och samma bränsles stökiometriska kvot i förblandat tillstånd.

Detta indikerar att den adiabatiska flamtemperaturen för diffusionsflamman, framräknad genom att anta stökiometrisk förbränning av bränslet är den samma som den adiabatiska flamtemperaturen vid stökiometri för en förblandad flamma med samma bränsle.

Med ett väldefinierat bränsle kan man därför använda metodiken för förblandade flammar för att räkna på adiabatisk flamtemperatur och därmed uppskatta om ett

brandgaslager kommer att bli brännbart. Genom att anta att brandgaslagret är välblandat, plus en hel del andra förenklingar, kommer man fram till en mycket enkel och användbar ekvation, se nedan. Vilka gaser som finns i brandgaslagret tas inte i beaktande.

$$\left( \frac{1-f}{1+r} \right) \left[ \frac{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}{C_p (T_{SL} - T_0)} \right] \geq 1 \quad \text{Ekvation 4.11}$$

där  $T_{SL}$  - den adiabatiska temperaturen vid stökiometri

$\phi$  - ekvivalenskvoten

$T_0$  - ursprungstemperaturen

$C_p$  - gasernas värmekapacitet

$r$  - stökiometrisk kvot

$\Delta H_{O_2}$  -13.4 MJ/kg

$Y_{O_2}$  - massfraktion syre i luften

Ekvationen går att härleda med hjälp av material från kursen Brandkemi som ges vid institutionen för brandteknik vid LTH /4.13/.

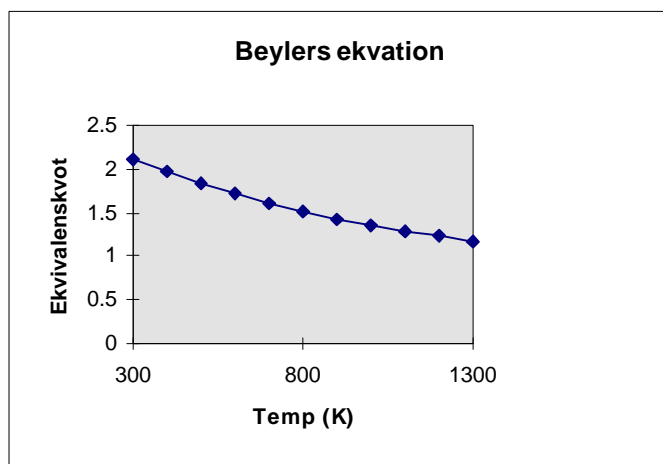
*Om ekvationen ger större värde än 1, kommer brandgaslagret att vara antändbart.*

Observera att  $\phi$  måste vara större än 1 för att ekvationen skall kunna ge något brännbart brandgaslager. Beyler antar att det inte bildas någon massfraktion bränsle i lagret om ekvivalenskvoten är under 1. Detta är en förenkling; i föregående avsnitt visades att det bildas små mängder oförbrända gaser även om ekvivalenskvoten är under 1.

Beylers metod bygger på ekvivalenskvoten och temperaturen i brandgaslagret. Ekvivalenskvoten är förhållandet mellan bränsle och luft vid den aktuella situationen delat med det stökiometriska förhållandet. Om ekvivalenskvoten överstiger 1 är situationen att betrakta som underventilerad. Under underventilerade förhållanden uppkommer en mängd oförbrända gaser som  $H_2$  och  $CO$ . Dessa har visat sig kunna uppskattas bra med hjälp av den aktuella ekvivalenskvoten. Resultatet av Beylers ansträngningar redovisas nedan.

Beylers ekvation förutsätter ett bränsle som enbart förångas i golvnivå och sedan transporteras till brandgaslagret genom brandplymen. I ett verkligt fall skulle det bildas pyrolysisprodukter på olika ställen i rummet.

För att brandgaslagret skall vara brännbart måste man ligga över kurvan i diagrammet.



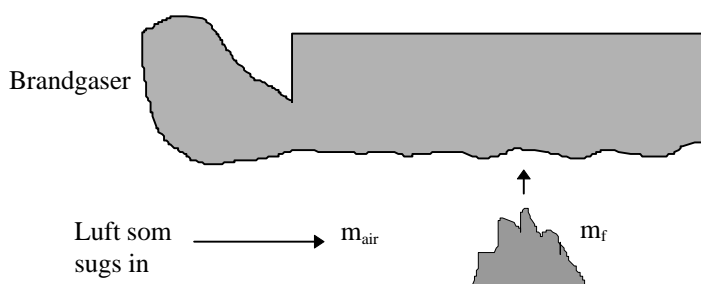
Figur 4.19, Kurvan är hämtad från ekvationen ovan, /4.11/.

Kurvan är framtagen för  $C_p = 1100 \text{ kJ/kgK}$ . Observera att detta värde normalt ändras med temperatur och ämne. Om man befinner sig under kurvan är brandgaslagret ej brännbart.

Nedan visas ett beräkningsexempel som bygger på en försöksserie som utfördes vid LTH under projektets gång /4.14/.

#### Beräkningsexempel: Brännbart brandgaslager eller inte

Försöket utfördes i ett rum med måtten  $1.2 \cdot 0.8 \cdot 0.8 \text{ m}^3$  och öppningen var  $0.2 \text{ m}$  hög och  $0.46 \text{ m}$  bred. Bränslet bestod av heptan och var placerat i golvnivå. I detta fall finns det inget bränsle på väggar och tak.



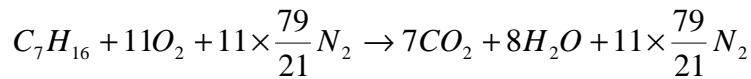
Under försöken mättes gastemperaturen, bränslets massförlust och flödet in genom öppningen. Genomsnittstemperaturen i brandgaslagret uppmättes till  $562 \text{ }^\circ\text{C}$ . Massförlusten i detta försök var ungefär  $2,2 \text{ g/s}$ .

Öppningens storlek är  $0.2 \cdot 0.46$  och vi kan överslagsmässigt beräkna massflödet in i rummet med uttrycket:

$$m_a = 0.5 \times A \times \sqrt{H}$$

$$\Rightarrow 0.5 * 0.2 * 0.46 * (0.2)^{0.5} = 20 \text{ g/s}$$

För att räkna ut det stökiometriska förhållandet används ekvationen:



$$\text{Massa bränsle} = 12 * 7 + 16 * 1 = 100 \text{g}$$

$$\text{Massa luft} = 11 * 32 + 11 * 79 / 21 * 28 = 1510 \text{g}$$

$$f = \frac{\left( \frac{m_f}{m_{air}} \right)_{akt}}{\left( \frac{m_f}{m_{air}} \right)_{stök}}$$

$$\Rightarrow (2,2/20)/(100/1510) = 1.66; \text{ ekvivalenskvoten är } 1.66$$

Dessa värdena används därefter i ekvation 4.11.

$$\left( \frac{1 - 1/f}{1 + r} \right) \left[ \frac{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}{C_p (T_{SL} - T_0)} \right] \geq 1$$

$$\text{Från försöket: } \phi = 1.66, r = 1/15.1, T_0 = 562 + 273$$

$$\text{Från Beyler: } \Delta H_{O_2} = 13.4 \text{ MJ/kg}, C_p = 1.1 \text{ kJ/kg K}, T_{SL} = 1700 \text{K}, Y_{O_2} = 0.233$$

Observera att  $C_p$  egentligen är beroende av temperaturen och ämnet.

Detta ger vänsterledet i ovanstående ekvation = 1.22; detta innebär brännbart brandgaslager, något som också konstaterades visuellt.

*Om man har ett väldefinierat bränsle och uppmätta värden på restprodukterna kan beräkningarna bli mer noggranna.*

Detta beskrivs betydligt mer utförligt i appendix D. Beylers metod verifieras med hjälp av småskaleförsök som utförts av författaren. Småskaleförsöken beskrivs i appendix B och C.

## 4.4 Tryckuppbyggnad i rum

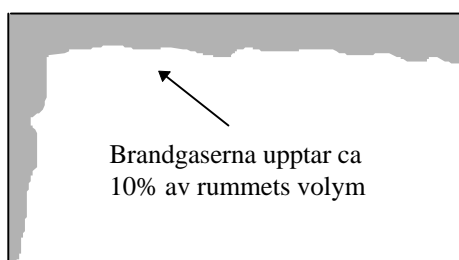
Detta avsnitt kommer att behandla storleken på det tryck som uppstår då en gasblandning antänds, tiden det tar för detta tryck att byggas upp samt olika byggnadskomponenters trycktålighet.

### 4.4.1 Skillnader mellan förblandade och icke förblandade gasmassor

Om en gasexplosion inträffar i ett stängt utrymme kommer ett tryck att alstras inne i rummet. Detta beror på att gasmassan expanderar när reaktionen utvecklar energi som utgår till att värma upp produkterna. Om det inte finns några öppningar eller om öppningarna är mycket små, kommer trycket att stiga i rummet. Även om det finns större öppningar är de kanske inte tillräckliga för att tryckavlasta rummet.

Tidigare i detta kapitel har diskuterats hur olika gasblandningar kan propagera flammor. Förbränningshastigheten varierar beroende på olika faktorer. Om gasmassan är förblandad kommer expansionen av gasen att gå mycket snabbt. En förblandad gasmassa sprider flammen med en hastighet av  $\approx 3-5$  m/s /4.15-16/. Detta kommer att orsaka en snabbare expansion än om en diffusionsflamma skulle sprida sig in brandgaslagret. Man kan överslagsmässigt beräkna hur mycket trycket kommer att öka i rummet beroende på hur tillslutet det är. Ju större öppningarna är desto mindre blir tryckuppbyggnaden. I nedanstående exempel belyses skillnaden mellan de tryck som kan uppstå i rummet om det är en förblandad flamma eller en diffusionsflamma som utbreder sig.

En viss volym brandgas antas i ett rum, se schematisk bild nedan. Denna antänds och trycket beräknas för olika öppningsfaktorer. Gasmassan expanderar ca 5-8 gånger när den tänds. Detta leder till en kraftig tryckökning om det inte finns några öppningar. Värden på normala läckageareor kan hämtas från ”Ventilationstekniskt brandskydd”/4.17/.



Bredd, ca 3m

Figur 4.20, Brandgaserna breder ut sig i rummet.

Ett antal beräkningar har utförts med hjälp av datorprogrammet FREIA /4.18/. Först antogs gasmassan vara förblandad, vilket innebär att flamhastigheten är i storleksordningen ett par meter per sekund. Flammen kommer att sprida sig över hela rummet på ungefär en sekund. Detta är givetvis grova antaganden, bl.a. eftersom  $S_u$  varierar kraftigt beroende på vilken typ av gas det gäller och var inom brännbarhetsområdet gasmassan befinner sig.



Beräkningarna kan bara ge en grov uppskattning av trycket i rummet och får absolut inte ses som några exakta resultat. Först är gasmassan **förblandad**:

Tabell 4.5, Vilka tryck bildas om gasmassan är **förblandad** före antändning?

Gasmassa, Vol%	Öppningsarea (m <sup>2</sup> )	Maximalt uppbyggt tryck (Pa)
10	0	≈ 66000
10	0.01	≈ 61000
10	0.1	≈ 30000
10	0.5	≈ 2000
15	0	≈ 92000
15	0.01	≈ 86000
15	0.1	≈ 47000
15	0.5	≈ 4000

Gasmassan brinner nu istället som en **diffusionsflamma**. Det tar ett antal sekunder innan gasmassan har brunnit av beroende på olika faktorer. Ett grovt antagande görs som innebär att gasmassan brinner av på 5-6 sekunder, då rummet är 3 meter brett. Detta är ungefär vad som har observerats i ett flertal fullskaleförsök under arbetets gång (samma storleksordning).

Tabell 4.6, Vilka tryck bildas om gasmassan **inte är förblandad** före antändning?

Gasmassa, Vol %	Öppningsarea (m <sup>2</sup> )	Maximalt uppbyggt tryck (Pa)
10	0	≈ 67000
10	0.01	≈ 1500
10	0.05	≈ 1100
15	0	≈ 92000
15	0.01	≈ 2700
15	0.05	≈ 1500

Tabellerna ovan visar klart skillnaden mellan om gasmassan antänds som en förblandad gasmassa eller som en diffusionsflamma.

*I de flesta brandsammanhang är gasmassan inte förblandad.*

Om gasmassan vore förblandad skulle dörrar och fönster ”tryckas ut” under normala rumsbränder. Sådan är inte verkligheten. I kapitel 5, 6 och 7 diskuteras i vilka situationer det kan vara realistiskt att anta att gasmassan är förblandad.

Begreppet **brandgasexplosion** används ofta i brandsammanhang och innebär att en större brandgasvolym har blivit förblandad innan antändning sker. Ju närmare stökiometri blandningen befinner sig desto kraftigare blir tryckökningen, vilket beror på att flamfrontshastigheten är högre.

*En brandgasexplosion är alltså en deflagration och skall inte förväxlas med begreppet detonation.*

Begreppet brandgasexplosion kommer att diskuteras vidare i kapitel 7.

Tiden fram till det att ett visst tryck har uppstått kan också beräknas. Det går att göra med hjälp av ekvation 4.12 nedan som beräknar vilket tryck som uppnås i rummet beroende av tiden. Förutsättningen för ekvationen är att gasmassan fyller ut hela rummet och att antändningen sker i mitten av rummet. Gasmassan antas vara förblandad.

*Beräkningsexempel: Tiden fram till tryckuppbyggnad, förblandad gasmassa*

Uppgiften består i att beräkna trycket i rummet 0.5 sekunder efter antändning. Blandningen består av metan nära stökiometri och rummets volym är 27 m<sup>3</sup>. Ekvation 4.12 används /4.10/:

$$P_1 = P_0 \times \exp\left(E^2(E-1)\left(S_u \times t / R\right)^3\right) \quad \text{Ekvation 4.12}$$

där  $P_0$  -är ursprungstrycket (101000 Pa)  
 $E$  -är expansionsfaktorn (ca 7 för metan vid stökiometri)  
 $S_u$  -är förbränningshastigheten (ca 0.4 m/s)  
 $t$  - är tiden  
 $R$  - är en karakteristisk dimension på rummet, i vanliga fall radien

Ett medelvärde på radien kan beräknas enligt följande:

$$4 \times 3.14 \times r^3 / 3 = V$$

Ekvation 4.12 kan då omskrivas enligt följande:

$$P_1 = P_0 \times \exp\left(E^2(E-1)\left(S_u \times t / R\right)^3\right)$$

Ju snabbare förbränningshastigheten är ( $S_u$ ) desto snabbare blir tryckuppbyggnaden.

Insättning av tiden 0.5 sekunder och angivna värden ovan ger ett övertryck på 40000 Pa i rummet efter 0.5 sekunder. Observera att detta gäller för ett stängt rum. Detta tryck skulle orsaka en totalskada i byggnaden. Beräkningsexemplet visar att tryckuppbyggnaden sker oerhört snabbt när en förblandad gasmassa antänds.

#### 4.4.2 Trycktålighet hos olika byggnadskomponenter

Några av de olika kolväten som visas i tabell 4.3 kan, vid stökiometriska blandningar, orsaka tryck på upp till 8 bar om de antänds inne i ett slutet rum /4.10/. I princip kan inga byggnader stå emot ett sådant tryck såvida de inte är specialkonstruerade för ändamålet. Vanligtvis kommer de klenaste delarna av byggnaden att ge vika och göra det möjligt för gaserna att passera ut. Detta kommer att minska tryckuppbyggnaden. Det kan dock fortfarande vara så att ventilationsareorna är för små vilket kommer att medföra att kraftigare byggnadsdelar kan ge vika.

Tabell 4.7 visar vid vilka tryck olika byggnadsdelar förstörs /4.10/. Siffrorna för trycken nedan måste anses vara överslagsmässiga och beror på vilket material det rör sig om och hur experimenten har utförts.

Tabell 4.7, Trycktålighet hos olika konstruktioner /4.10/

Typiska tryck vid vilka olika byggnadskonstruktioner förstörs		
Konstruktion	Tryck (mbar)	Tryck (Pa)
Glasfönster	20-70	2000-7000
Rumsdörrar	20-30	2000-3000
Lättväggar (trästomme och träskiva)	20-50	2000-5000
Dubbla gipsplattor	30-50	3000-5000
10 cm tegelvägg	200-350	20000-30000

Ovan har förblandade flammor och diffusionsflammor diskuterats. Dessa har jämförts vad gäller tryckuppbyggnad i rum.

#### 4.4.3 Detonation

I tidigare avsnitt har det diskuterats hur en deflagration kan uppstå vid antändning av en förblandad gasmassa.

*Det är dock under mycket speciella förhållanden möjligt för flammor att transporteras mycket snabbare, t.o.m snabbare än ljudet. Detta kallas detonation.*

I en detonation orsakas reaktionen i blandningen av gas och luft av kompression och upphettning av de gaser som följer efter en tryckvåg, även kallad chockvåg. Chockvågen och flamfronten är sammankopplade och transporteras genom gas-luft blandningen med hög hastighet. Hastigheten når ofta upp till ljudhastigheten. Trycket som alstras av en detonation är mycket komplext och kan bli så högt som 20 bar /4.10/. Detta tryck alstras på millisekunder. Vid en detonation minskar hastighet och täthet över reaktionszonen samtidigt som trycket ökar.

Detonationer inträffar nästan aldrig i samband med bränder. De detonationer som har inträffat är när blandningar har befunnit sig i smala rör där förhållandet mellan längden och diametern är mycket stort. Det är framför allt detta förhållande som gör att detonationer nästan aldrig inträffar i brandsammanhang. Ett tänkbart scenario skulle kunna vara någon lång och smal ventilationskanal. Då detonationer

är sällsynta inom detta område behandlas de inte vidare i denna rapport. Den intresserade läsaren hänvisas till /4.9-10/.

*Detonationer förknippas oftast med explosiva material, exempelvis dynamit.*

## 4.5 Sammanfattning av begrepp

Nedan följer en sammanställning av de viktigaste begreppen i detta kapitel.

### **Mager**

En förblandad gasmassa som ligger nära den undre brännbarhetsgränsen. Eftersom begreppet förutsätter att gasmassan är förblandad, bör det inte användas i normala brandsammanhang.

### **Fet**

En förblandad gasmassa som ligger nära den övre brännbarhetsgränsen. Eftersom begreppet förutsätter att gasmassan är förblandad, bör det inte användas i normala brandsammanhang.

### **Deflagration**

Begreppet deflagration är förknippat med en förblandad gasmassa. Deflagration kan orsaka kraftiga tryckuppbyggnader i rum.

### **Detonation**

Detonationer är mycket komplexa och kan orsaka tryck på upp till 20 bar. Hastigheten på flamfronten kan vara i storleksordningen ljudhastigheten. Detonationer inträffar nästan aldrig i brandsammanhang.

### **Förblandad flamma**

En förblandad flamma uppstår då bränslet och luften är väl blandade med varandra innan antändning sker.

### **Diffusionsflamma**

En diffusionsflamma uppstår då bränslet och luften inte är blandade med varandra då antändning sker. Bränsle och luft diffunderar in i varandra och ett brännbart område uppstår i gränsskiktet mellan dem.

### **Turbulent**

Om hastigheten på den utströmmande bränslegasen blir högre än inblandningen av syre från luften sker sammanblandningen i virvlar. Detta kallas turbulens.

### **Laminär**

Om två partiklar startar på samma punkt, följer de samma rörelsemönster. Den laminära strömningen sker parallellt utan turbulens.

### **Laminär förbränningshastighet ( $S_u$ )**

Den hastighet med vilken den kalla gasen rör sig in i flamman

### **Flamhastighet ( $S_f$ )**

Den hastighet med vilken flamfronten rör sig i förhållande till en fix punkt.

### **Turbulensfaktor ( $\beta$ )**

När flammen utbreder sig kommer flammans area att öka och den bryts upp, vilket gör att flamfrontens area blir större.

### **Expansionsfaktor (E)**

När gasen antänds stiger temperaturen en faktor 5-8. Detta gör att gasen expanderar med motsvarande storleksmått enligt allmänna gaslagen.

### **Ekvivalenskvot ( $\phi$ )**

Ett mått på förhållandet mellan bränsle och luft i den aktuella blandningen och mellan bränsle och luft i stökiometrisk blandning. Om  $\phi > 1$  är branden ventilationskontrollerad och om  $\phi < 1$  är branden bränslekontrollerad.

### **Förbränningseffektivitet ( $\chi$ )**

Ett ämne som brinner utvecklar sällan all sin energi även om syretillförseln är god. En del lämnas oförbrukad i den plym som för brandgaserna till taket. Den del som förbränns effektivt och utvecklar hela energiinnehållet ges av  $\chi$ .

### **Bränslekontrollerad (välventilerad)**

Om det finns mer syre än vad som krävs för att förbränna bränslet kallas branden bränslekontrollerad eller välventilerad,  $\phi < 1$ .

### **Ventilationskontrollerad (underventilerad)**

Finns det för lite luft för att förbränna allt bränsle kallas branden ventilationskontrollerad eller underventilerad. Det kommer då att bildas oförbrända gaser i brandgaslagret. Dessa bränder har en ekvivalenskvot som överstiger 1.

### **Stökiometri**

När det finns precis så mycket luft som behövs för att förbränna bränslet fullständigt bildas bara koldioxid och vatten. Detta förekommer ytterst sällan i praktiken.

### **Adiabatisk flamtemperatur**

Om all energi som frigörs vid förbränningen går åt till att värma upp produkterna kallas den temperatur som uppnås för adiabatisk flamtemperatur. Det är den högsta temperatur som kan förekomma. Detta är i praktiken sällan förekommande.

### **Oförbrända brandgaser**

Fortgår branden under otillräcklig syretillförsel kommer det att bildas oförbrända brandgaser. Oförbrända gaser bildas även om det finns god tillgång på luft. De oförbrända gaserna innehåller energi som kan frigöras under senare skede och orsaka temperaturhöjning.

### **Hess lag**

Summan av delreaktionernas energiutveckling är lika med totalutvecklingen vid fullständig förbränning.

## 4.6 Slutsatser

Om branden är kraftigt ventilationskontrollerad kommer oförbrända brandgaser att följa med plymen upp i brandgaslagret. Energin i brandgaslagret kan utvinnas om proportionerna mellan bränsle och luft är rätt samtidigt som en tändkälla är närvarande. Om energin i brandgaslagret frigörs kommer strålningsnivån i rummet att öka kraftigt.

Det har visat sig att halten oförbrända gaser i brandgaslagret är starkt förknippad med ekvivalenskvoten,  $\phi$ , som är ett mått på ventilationens storlek. Med hjälp av  $\phi$  kan man uppskatta hur höga halter av  $H_2$ , CO,  $CO_2$ , HC o.s.v. som finns.

Om brandgaslagret antänds kan det uppkomma flammor av två slag:

- *Förblandade flammor, där bränslet och luften har blandats innan antändning sker*
- *Diffusionsflammor, där syret diffunderar in i bränslet*

I detta kapitel har det inte diskuterat vilka situationer som kan leda till de olika fenomenen, men det är viktigt att konstatera att gasmassan i de flesta inomhusbränder inte är förblandad. Istället kommer en diffusionsflamma att utvecklas.

En diffusionsflamma uppstår i gränsskiktet mellan bränsle och luft. Därför kan man inte tala om brännbarhetsgränser, använda begrepp som mager och fet eller koncept rörande förbränningshastighet för att beskriva en diffusionsflamma.

Om diffusionsprocesserna dominerar i brandgaslagret kommer inte expansionen av gaserna att ske lika häftigt och förloppet är enklare att kontrollera; tryckökningen i rummet blir inte lika kraftig.

Om hela eller större delar av gasmassan är förblandad innan antändning sker, kommer tryckökningarna att bli kraftiga om rummets öppningar inte är tillräckliga för att tryckavlasta rummet. Det räcker med en liten volym av den totala rumsvolymen för att tryckökningen skall bli mycket stor. Ju större öppningsfaktorn är desto mindre blir tryckuppbyggnaden och ju mer energi gaserna innehåller desto högre blir förbränningshastigheten.

Förblandade förlopp orsakar ofta mycket farliga situationer och risken för brännskador och skador p.g.a. tryckökning är mycket stora.

I brandsammanhang används ofta orden *mager* och *fet* för att beskriva brandgaslagrets sammansättning. Dessa begrepp förutsätter att gasmassan är förblandad vilket inte är fallet under de flesta rumsbränder.

## **4.7 Referenser**

- /4.1/ Karlsson, B., Quintere, J., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /4.2/ Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, Chichester 1985
- /4.3/ Gottuk, D.T., Roby, R.J., "Carbon monoxide production in compartment Fires, Journal of Fire Protection Engineers, 4, pp 133-150, 1992
- /4.4/ Gottuk, D.T., Roby, R.J., "Effect of combustion conditions on species produktion", Section 2, Chapter 7, SFPE
- /4.5/ Beyler, C.L., "Major species production by diffusion flames in two layer compartment environment", Fire Safety Journal, 10 47-56 (1986)
- /4.6/ Bengtsson, L-G., Karlsson, B., Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion, Rapport no, P21-185/97, Räddningsverket, Karlstad 1997
- /4.7/ Ondrus, J., Brandförlopp, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1990
- /4.8/ Ondrus, J., Brandteori, Räddningsverket, 1996
- /4.9/ Glassman, Irvin., Combustion, third edition, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey 1996
- /4.10/ Harris, R.J., "The investigations and control of gas explosions in buildings and heating plant, London 1983
- /4.11/ Beyler, Craig., "Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames", Section 2/ Chapter 9, SFPE handbook
- /4.12/ Simmons., R.F., Wolfard., R.F., Combustion and Flame, 1, 155 (1957)
- /4.13/ Kursmaterial, "Brandkemi", Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /4.14/ Bengtsson, L-G., Experiment och modeller, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /4.15/ Drysdale, D.D., "The flashover phenomenon", Fire Engineers Journal, Nov, 1996
- /4.16/ Drysdale, D.D., "Flames in Fires and Explosions", Fire Engineers Journal, July, 1997
- /4.17/ Backvik, B., et al, "En handbok om brandskyddsteknik för



ventilationssystem”, ISBN 91-630-4419-6, Stockholm 1996

/4.18/ Andersson, Petra., ”Datorprogram FREIA”, Institutionen för brandteknik,  
Lunds Universitet, Lund

## 5 ÖVERTÄNDNING

### *Inledning*

Termen övertändning har använts åtminstone under de senaste 40 åren. Definitionen har varit något vag och under senare år har det olyckligtvis uppkommit ett flertal olika tolkningar. Begrepp som rollover, mager övertändning /5.1/, spreadover och flameover har förekommit som ersättnings- och/eller kompletteringsbegrepp utan någon enad struktur. Tyvärr innebär detta att det finns gott om utrymme för missförstånd och det vore utomordentligt bra om alla kunde enas om en definition (förslagsvis ISO-definitionen) som kan användas av alla, varsohelst i världen, oavsett om man jobbar inom räddningstjänsten, som försäkringsmäklare eller som konsult.

Om man använder ordet övertändning i rätt betydelse kommer det inte att finnas behov av andra termer. Undantaget är begreppen backdraft och brandgasexplosion som beskrivs i de följande kapitlen.

Övertändningar i byggnader är ibland orsak till att människor omkommer och det är därför viktigt att känna till vilka situationer som orsakar övertändningar. Det är speciellt viktigt för de personer som skall bekämpa rumsbränder där övertändningar kan uppstå. Räddningstjänstpersonal behöver en grundläggande förståelse för de faktorer som påverkar rumsbrandens utveckling, dvs de faktorer som gör att en brand växer mot övertändning.

I detta kapitel ges en beskrivning av de mekanismer som leder till att en övertändning kan uppstå. Den grundläggande förutsättningen är att det finns tillräckligt med bränsle i förhållande till rummets volym. Branden ges möjlighet att utvecklas till övertändning genom att det finns öppningar i rummet.

Kapitlet beskriver också vad som sker i brandgaslagret vid övergången till den fullt utvecklade rumsbranden. Det är speciellt intressant att studera vilken typ av flamma som är involverad när fenomenet övertändning inträffar. Kapitlet avslutas med en praktisk beskrivning av en verklig olycka där följden av en övertändning blev ett antal dödsoffer. Kännetecken på en nära förestående övertändning diskuteras fristående i kapitel 8.

Beskrivningen i detta kapitel sker kvalitativt till största del men det är också möjligt att med hjälp av modeller beskriva övertändning ur en kvantitativ synvinkel.

I dagsläget finns en rad modeller som kan användas för att uppskatta om övertändning kommer att uppstå eller inte. Några av dessa är:

- Flashover A1, som bygger på om en termisk instabilitet inträffar eller inte.
- CFAST, som är en tvåzonsmodell som används av många konsulter.
- SOFIE, som är en fältmodell som används av forskare.

- MQH- metoden, som är en handberäkningsmodell.

Dessa modeller utvärderas i appendix E- H. Utvärderingen sker med hjälp av försök som finns beskrivna i appendix B och C.

### ***Innehållsförteckning***

5.1 Definition av begreppet övertändning .....	5-3
5.2 En modell för att beskriva övertändning .....	5-5
5.2.1 Effektutveckling .....	5-5
5.2.2 Förbränningshastighet .....	5-8
5.3 Processer i brandgaslagret .....	5-12
5.4 Branden i ”The Stardust Club”, Dublin .....	5-16
5.5 Slutsatser.....	5-18
5.6 Referenser .....	5-19

## 5.1 Definition av begreppet övertändning

Det finns ett antal definitioner av begreppet övertändning. De är dock snarlika. Några av de vanligaste är de definitioner som anges av den internationella standardiseringsorganisationen (ISO) och av Fire Research Station i England.

ISO-definitionen av övertändning är följande:

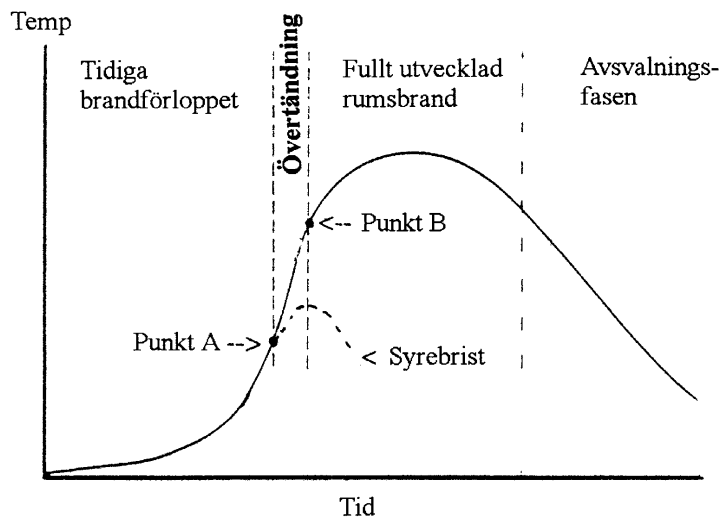
*”The rapid transition to a state of total surface involvement in a fire of combustible materials within an enclosure”/5.2/*

Definitionen betonar dock inte att övergången bibehålls, vilket är ett av kännetecknen för övertändning. Fire Research Station har därför valt att förtydliga detta genom följande definition (översatt till svenska):

*”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” /5.3/.*

Båda dessa definitioner betyder ungefär samma sak och vilken som används är relativt oviktigt. I denna rapport används den sistnämnda eftersom den är tydligast.

Av definitionen följer att övertändning inte klassificeras som en mekanism utan som en övergångsperiod beroende av ett antal mekanismer som var och en bidrar till växandet av initialbranden till den fullt utvecklade branden, se figur 5.1.



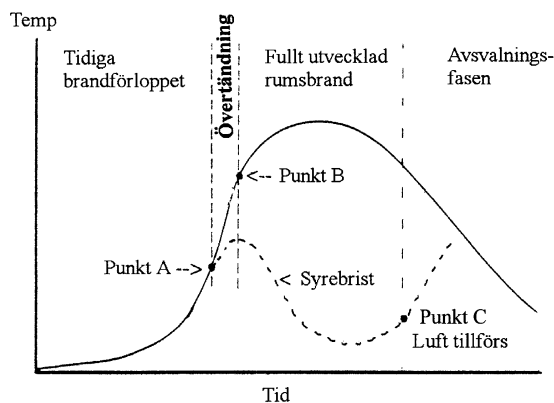
Figuren 5.1, Brandförloppet i ett rum

Det är viktigt att betona att övertändning inte antas ha inträffat förrän den fullt utvecklade branden har uppstått. Punkt A i figuren kan motsvara stadiet då flammorna nått taket i ett rum. Punkt B motsvarar tiden då den fullt utvecklade branden har uppstått. Tiden mellan A och B kan i vissa speciella fall vara kort,

endast ett fåtal sekunder. Detta har bl.a. observerats under fullskaleförsök utförda av Bengtsson et al /5.4/. Försöken finns redovisade i detalj i kapitel 9. Övertändning kan sägas vara en tidsperiod från att branden är lokalt belägen till dess att hela rumsvolymen är involverad i flammor.

Denna beskrivning förutsätter att branden är bränslekontrollerad till en början, d.v.s. att det finns en öppning i rummet. När övertändningen inträffar övergår branden till att bli ventilationskontrollerad i nästan alla fall. Detta kan förklaras genom att alla de pyrolysyprodukter som bildas inne i rummet inte kan förbrännas på plats p.g.a. syrebrist. De oförbrända gaserna kommer då att brinna utanför rummet, vilket syns i form av flammor.

Om brandrummet inte har någon öppning i början av brandförloppet eller endast små läckageareor kommer brandförloppet att avta, t.ex. enligt nedanstående figur (se streckad linje).



Figur 5.2, Brandutveckling om rummet inte har en större öppning, se streckad linje

Efter att branden nått punkt A i figur 5.2 kommer temperaturen att avta. Detta sker t.ex. kort efter att flammorna nått taket i ett rum i samband med att syret tar slut. Branden avtar innan övertändning har uppkommit. Denna situation är vanlig om branden utvecklas i ett stängt rum och om inga öppningar tillkommer, t.ex. att fönsterrutor går sönder.

Det är viktigt att konstatera att situationen ändå kan bli farlig; fenomenet backdraft kan inträffa om luft introduceras i lägenheten t.ex. i samband med rökdykarnas inträngning. Följden kan bli en mycket snabb förbränning och detta kan i sin tur leda till övertändning, se punkt C i figuren ovan. Backdraft diskuteras i kapitel 6.

Begreppet övertändning, ”flashover”, används i många länder, exempelvis England, USA, Japan, Nya Zeeland och Australien för att nämna några. Det svenska ordet ”övertändning” är en direkt översättning av det engelska ordet ”flashover”.

## 5.2 En modell för att beskriva övertändning

Ett mycket stort antal fullskaleexperiment, som utförts både i Sverige och internationellt, har visat att för att en övertändning skall kunna inträffa, krävs det att branden överstiger en kritisk nivå som mäts i form av avgiven värmeeffekt (kW). Denna beror främst på rummets storlek, väggarnas termiska egenskaper och ventilationsarean. Det bygger i grunden på energibalansen för ett rum. Experimentella observationer har gett att strålningen vid golvnivå måste uppgå till ungefär 20 kW/m<sup>2</sup> och temperaturen under taket till ca 600 °C (för takhöjder på ca 2.5-3.0) för att en övertändning skall kunna inträffa. En vanligt förekommande indikation på att övertändning är nära förestående är att flammor börjar sprida sig ut genom öppningarna i byggnaden /5.5/. I detta skede ökar strålningsnivåerna i rummet kraftigt.

De flesta av dessa experiment har utförts i rum med öppningar av varierande storlek. Övertändning i mer eller mindre stängda lokaler förekommer knappast, men en ansamling av oförbrända gaser kan orsaka en s.k. backdraft när dörrar eller fönster öppnas, vilket sedan kan leda till övertändning. Fenomenet backdraft behandlas särskilt i kapitel 6.

### 5.2.1 Effektutveckling

Korrelationer av data från över 100 brandförsök som har utförts i varierande rumsstorlekar /5.6/ har indikerat att den värmeutveckling som krävs för övertändning kan beskrivas med följande formel:

$$\dot{Q}_{fo} = 610(h_k A_T A_w \sqrt{H})^{0.5} \quad \text{Ekvation 5.1}$$

där  $\dot{Q}_{fo}$  - den värmeeffekt som behövs för att initiera övertändning (kW)

$h_k$  - värmeövergångstalet (kW/m<sup>2</sup>K)

$A_T$  - inre omslutningsarean i rummet (m<sup>2</sup>)

$A_w$  - area av ventilationsöppning (m<sup>2</sup>)

$H$  - höjden på ventilationsöppningen (m)

Ekvation 5.1 har tagits fram för rum av vanlig rumsstorlek. Den har dock visats gälla i stor utsträckning för rum som är betydligt större.

Ekvationen har tagits fram genom fullskaleförsök i mycket varierad skala dock inte större än ovanstående nämnda mått. En mängd olika bränslen har testats, bl.a. trä, plast och olika gaser. Både fönster och dörrar har använts som öppningar. Materialet i väggar och tak har haft mycket varierande egenskaper.

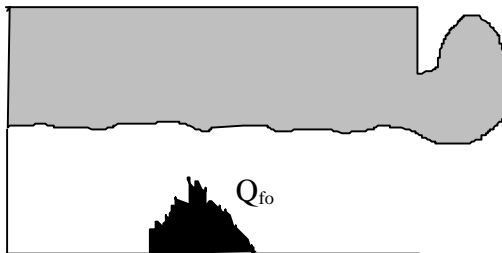
Denna ekvation har dock vissa begränsningar. Den gäller endast för bränslekontrollerade bränder och då brandkällan inte är placerad i närheten av någon vägg. Om den vore placerad i närheten av en vägg skulle koefficienterna i ekvationen vara annorlunda. Ekvationen gäller för temperaturer mellan ca 20 och 700°C /5.7/.

Ekvationen togs ursprungligen fram för att man ville kunna uppskatta temperaturen i ett rum före övertändning. Ekvation 5.1 är en omskrivning där man har antagit att temperaturen 600°C orsakar att övertändning uppstår.

För att visa användbarheten av ovanstående ekvation utförs ett enkelt beräknings-exempel. Metoden finns utförligt beskriven i appendix H.

*Beräkningsexempel: Effektutveckling som krävs för övertändning /5.7/*

Antag ett rum med måtten 3.6m\* 2.4m\* 2.4m. Öppningen är en dörr med bredden 0,8 m och höjden 2m. De omslutande materialen är lättbetong. Beräkna den effektutveckling som behövs för att rummet skall gå till övertändning.



Figur 5.3, Vilken effektutveckling behövs för att nå övertändning ?

Inledningsvis räknas  $h_k$  ut. För relativt korta tider bestäms  $h_k$  av  $h_k = (k\rho c/t)^{0.5}$  där  $k\rho c$  är materialegenskaper och  $t$  är tiden från det att branden börjar.  $k\rho c$  för lättbetong är ungefär 75000 W<sup>2</sup>s/m<sup>4</sup>K<sup>2</sup>. Tiden antas vara 10 minuter; vid denna tidpunkt kan man anta att räddningstjänsten anländer.

$h_k$  beräknas med uttrycket  $\sqrt{krc/t}$  och blir lika med 0.0112 kW/m<sup>2</sup>K

Värdena sätts in i ekvationen:

$$\dot{Q}_{fo} = 610(h_k A_T A_w \sqrt{H})^{0.5} \quad \text{Ekvation 5.1}$$

Denna ger:  $\dot{Q}_{fo} = 610 (0.012*44,48*1.6*2^{0.5})^{0.5} = 650 \text{ KW}$

Detta kan jämföras med en soffa som utvecklar ca 1- 2 MW /5.8/. Effekten som behövs är alltså mycket mindre än detta.

Om vi istället hade beräknat effektutvecklingen som behövs för att ge övertändning efter 2-3 minuter skulle den blivit mycket större.

Effektutvecklingen styrs antingen av tillgången till syre eller bränslets förbränningshastighet. När tillgången till syre är begränsad och effektutvecklingen styrs av denna tillgång kallas branden ventilationskontrollerad. När det finns tillräckligt med syre och brandens storlek kontrolleras av bränslets förbränningshastighet, kallas branden bränslekontrollerad. Ovanstående ekvation gäller alltså för bränslekontrollerade bränder.

Om branden är ventilationskontrollerad kommer effektutvecklingen i rummet att vara begränsad av den mängd luft som strömmar in genom öppningen. Denna mängd ges av ekvation 5.2. Observera att i verkligheten används inte all luft som går in i rummet till förbränningen. Därför utvecklas inte lika mycket energi i rummet som ekvationen nedan ger.

$$\dot{m}_a = 0.5A_w\sqrt{H} \quad (\text{kg/s}) \quad \text{Ekvation 5.2}$$

där  $\dot{m}_a$  (kg/s) är massflödet av den inströmmande luften,  $A_w$  (m<sup>2</sup>) arean av öppningen och  $H$  (m) är höjden av öppningen. Mängden energi som frigörs när syret i 1kg luft reagerar fullständigt med bränsle är ca 3 MJ/kg. En ventilationsöppning på t.ex. 2x1 m<sup>2</sup> möjliggör en effektutveckling på 4.2 MW, om det antas att allt syre används till förbränningen. Det extra bränsle som eventuellt finns kommer att brinna utanför rummet.

I resonemanget som följer antas det att rummet inte är helt stängt, vilket innebär att branden har möjlighet att växa till övertändning förutsatt att det finns bränsle. I kapitlet 6 diskuteras hur en starkt begränsad syremängd påverkar processerna i brandrummet. Med starkt begränsad åsyftas att rummet nästan är helt stängt.

Den värmeeffekt som krävs för övertändning kan omräknas till en förbränningshastighet med hjälp av ekvation 5.3 /5.9/.

$$\dot{Q} = \dot{m} DH_c \chi \quad \text{Ekvation 5.3}$$

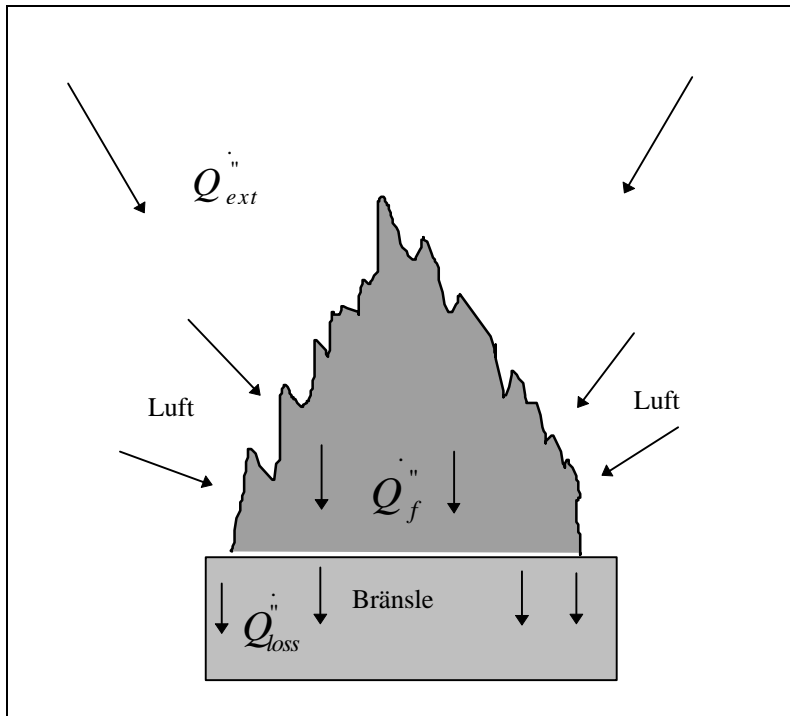
där  $DH_c$  - förbränningsvärmets värme (J/kg)  
 $\chi$  - förbränningseffektivitet  
 $\dot{m}$  - förbränningshastighet (kg/s)

### 5.2.2 Förbränningshastighet

Vilka processer i brandrummet är det då som gör att förbränningshastigheten ökar till den kritiska nivån, dvs den nivå som behövs för att övertändning skall kunna uppstå?



Betrakta figur 5.4 som schematiskt visar värmebalansen vid en bränsleyta. Det bör poängteras att det är en klar förenkling av en rumsbrand när bränslet endast är beläget på golvet i rummet, men för att göra processerna klarare används en förenklad bild enligt nedan. Det viktiga är att känna till att det är stor skillnad om t.ex. en möbel förbränns ute i det fria eller inne i ett rum där den påverkas av strålning från flammor och väggar samt av brandgaser.



$\dot{Q}_{loss}$  - Värmeförluster från bränsleytan (kW/m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}_{ext}$  - Strålning från omgivande delar (kW/m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}_f$  - Värmeövergång från flammen (kW/m<sup>2</sup>)

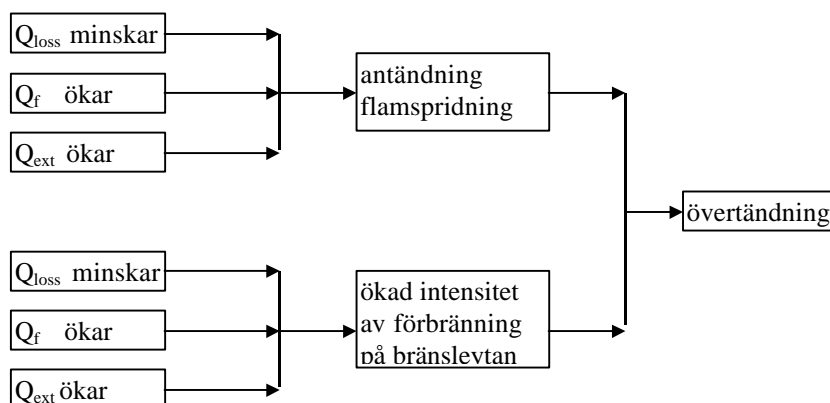
Figur 5.4, Värmebalansen vid en bränsleyta

Värmebalansen vid en bränsleyta kan beskrivas med ekvation 5.4 /5.10/.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_f + \dot{Q}_{ext} - \dot{Q}_{loss}}{L_v} A \quad \text{Ekvation 5.4}$$

där  $\dot{m}$  är förbränningshastigheten i g/s,  $\dot{Q}_f$  är värmeövergången från flaman till den brinnande ytan (kW/m<sup>2</sup>) och A är bränslearean i m<sup>2</sup>.  $\dot{Q}_{ext}$  är strålningen från den omgivande delarna till bränsleytan (kW/m<sup>2</sup>).  $\dot{Q}_{loss}$  motsvaras av den energi som leds in i materialet utan att direkt användas till att förångna nytt material. Efter ett tag då materialet har blivit mättat kommer denna att minska.  $L_v$  (kJ/g) är förångningsvärmets, d.v.s. den värmemängd som behövs för att 1g gas skall lämna bränsleytan. Förångningsvärmets antas ofta vara en materialkonstant men är, för många material, en funktion av materialets temperatur.

Figur 5.5 visar ett träd-diagram som illustrerar vilka mekanismer som är grundläggande för om övertändning kan uppkomma eller inte. Diagrammet är direkt förknippat med ekvation 5.4.



Figur 5.5, De grundläggande mekanismer som leder till ökad värmeeffekt och därmed möjlig övertändning.

Figur 5.5 visar att det framför allt är två grundläggande mekanismer som leder till att övertändning kan uppstå /5.9/ :

- 1 **Flamspridning och antändning (initialbrandens area ökar)**
- 2 **Ökad intensitet av förbränningen på en bestämd bränsleyta**

Dessa två mekanismer är sedan var för sig beroende av tre olika processer som är nära knutna till varandra, nämligen:

- $Q_{\text{loss}}$  (den energi som når bränslet men som inte används till förångning)
- $Q_f$  (värmens från flammen)
- $Q_{\text{ext}}$  (strålning från omgivande områden)

### $Q_{\text{loss}}$

Det första av dessa begrepp är en konsekvens av det faktum att i det tidiga skedet av branden används en stor del av den energi som transporteras till bränslet till att höja temperaturen hos bränslet istället för att producera ångor från ytan.

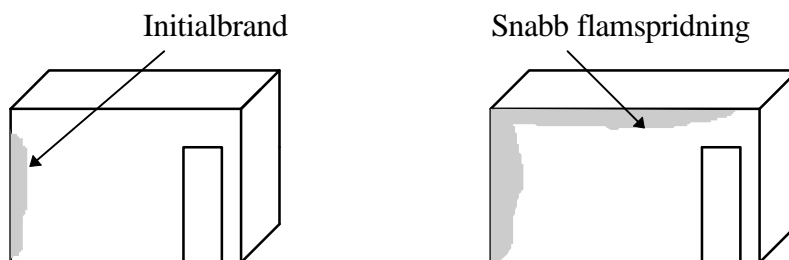
Exempelvis kommer en brinnande termoplast inte att nå sin maximala förbränningshastighet förrän en stor del av materialet har smält till en poolbrand. Denna process tar upp mycket energi. Efter ett tag kommer dock bränslet och dess underliggande ytor att uppträda som mättade med värme och då kommer  $Q_{\text{loss}}$  att minska. Enligt ekvationen 5.4 kommer då förbränningshastigheten att öka.

### $Q_f$

Värmen från flammen (initialbranden) bidrar dels till att förånga materialet under initialbranden, dels till att värma upp materialet utanför denna. Detta leder till flamspridning och ökad bränsleyta. Flamspridningshastigheten beror i hög grad på vilka material som är inblandade, men kanske ännu mer på konfigurationen av bränslearean runt initialbranden; flamspridningen går exempelvis mycket snabbare på en vertikal yta jämfört med en horisontell. För en mer ingående beskrivning av flamspridningsprocessen, se kapitel 3. När materialet väl har antänts kommer en brännbar väggbeklädnad att sprida flammorna väldigt snabbt och ge förlängda flammor under taket. Strålningsnivåerna i rummet ökar då drastiskt. Detta inträffar ofta strax innan rummet blir övertänt, se figur 5.6.

Observera att vi inledningsvis diskuterade flamspridning på ett material i golvnivå men principen för ökning av förbränningshastighet är givetvis densamma oavsett var materialet sitter. Flamspridningen leder till att övertändning kan uppstå.

Detta beskrivs i figur 5.6.



Figur 5.6, Flamspridning under taket.

Om värmen från flammen ökar, ökar förbränningshastigheten på brandens ursprungsyta.

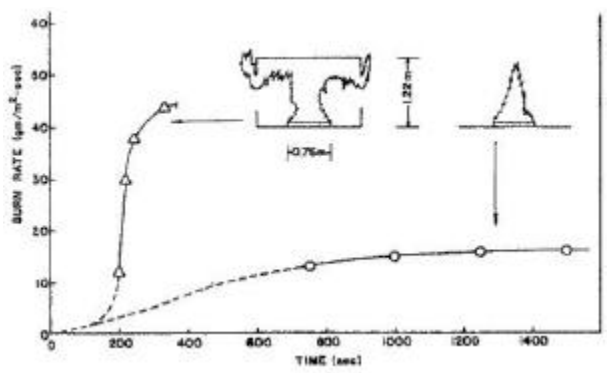
I ett flertal uppmärksammade olyckor under de senaste åren har brandförloppen varit mycket hastiga. Några exempel är King's Cross tunnelbanestation i London där flera människor omkom, diskoteksbranden på Stardust Club i Dublin och The Summerland fire, Isle of Man /5.11/.

*I dessa fall har flamspridningsprocessen varit helt avgörande för de tragiska händelseförloppen och om denna hade kunnat undvikas hade inte tragedierna behövt inträffa.*

Diskoteksbranden på Stardust Club i Dublin beskrivs i avsnitt 5.4

### $Q_{ext}$

Ökningen av förbränningshastigheten hos material som redan brinner kommer att ske i ett rum när värmestrålningen från de övre delarna i rummet ökar. Friedman /5.12/ visar att förbränningshastigheten kan bli upp till 3-6 gånger så stor om den externa strålningen får verka på materialet, se figur 5.7.



Figur 5.7, PMMA under olika förhållanden /5.9/

Vid en rumsbrand samlas brandgaserna under taket och den övre delen av rummet kommer att rökfyllas, under förutsättning att gaserna inte passerar ut genom någon öppning. De instängda brandgaserna och de varma övre ytorna resulterar i värmestrålning till både bränslet och övriga brännbara ytor. Detta bidrar till ökad förbränningshastighet hos redan brinnande ytor samt uppvärmning av annat potentiellt bränsle. Detta ger en ökad flamstorlek, som i sin tur ökar temperaturen, som i sin tur ökar återstrålningen o.s.v.

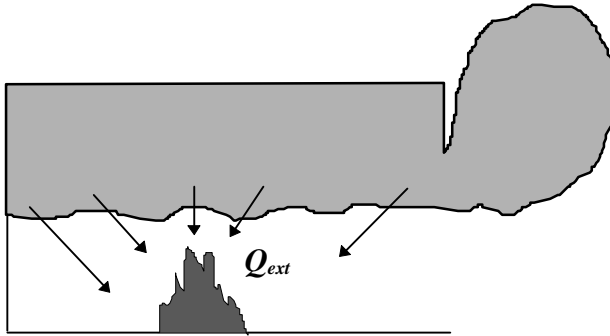
Den externa strålningen kommer också att bidra till att flamspridningsprocessen går snabbare. Detta orsakar ett accelererande förlopp under förutsättning att brandrummet innehåller tillräckligt med bränsle.

Det bör nämnas att när branden har varit kraftigt ventilationskontrollerad en längre tid (t.ex. i ett mer eller mindre stängt rum) kan backdraft inträffa vid ändring av ventilationsförhållandena. Detta innebär en stor ökning i  $Q_{ext}$ , vilket kan leda till plötslig ökning av förbränningshastigheten och därmed eventuellt leda till övertändning.

### 5.3 Processer i brandgaslagret

Förbränningen av brandgaslagret är helt klart karakteristisk för övertändningsprocessen. Brandgaslagret brukar antändas strax innan övertändningen äger rum. Detta avsnitt diskuterar på vilka olika sätt detta kan ske. Avsnittet diskuterar kvalitativt hur antändning av brandgaslagret sker. För en mer kvantitativ beskrivning kan Beylers modell användas. Denna finns beskriven i appendix D.

*De processer som kan ske i gaslagret, om det innehåller oförbrända brandgaser, kan leda till förbränning som i sin tur kan leda till en kraftig ökning i  $Q_{ext}$  och därmed till övertändning.*



Figur 5.8, När lagret antänds ökar strålningen i rummet.

De oförbrända brandgaserna bildas när syretillförseln inte är tillräcklig. Även om det finns tillräckligt med syre bildas alltid en viss mängd oförbrända brandgaser, beroende på graden av ofullständig förbränning i rummet,  $\chi$ .

De processer som sker i gaslagret under en brand är relativt komplexa. Beyler /5.13/ genomförde en detaljerad studie, där han utredde sammansättningen av gaserna i brandgaslagret under en rad omständigheter som efterliknade varje steg av den växande branden.

Beylers försök /5.13/ utfördes under en huv där gaserna kunde samlas. Gasformiga bränslen i form av propan och propen användes. Flytande bränslen testades också i ett kärl. Under försöken mättes både temperatur och koncentrationer av olika produkter. I dessa försök fanns dock inget bränsle på väggar och tak, vilket det normalt finns i de flesta rum.

Resultaten användes för att ta fram korrelationer för när ett brandgaslager börjar brinna samt för att korrelera brandgasernas innehåll med ekvivalenskvoten. Detta har diskuterats översiktligt i kapitel 4. Nedan följer en beskrivning av vad som händer innan brandgaslagret börjar brinna.

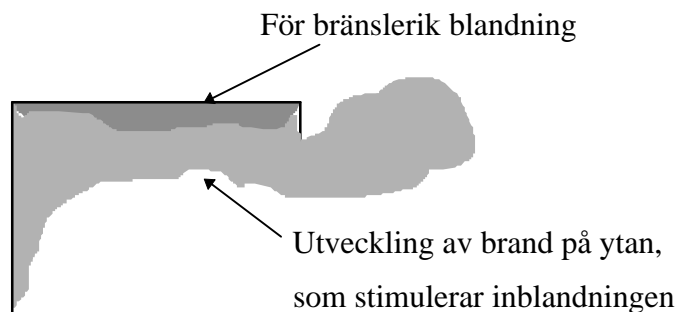
När flamman växer i storlek nås ett stadium där flamtoppen penetrerar brandgaslagret och slår i taket. När flamtoppen når taket är stadiet kritiskt och detta kan jämföras med att en brandgastemperatur på 600° C under taket kan starta övertändningsprocessen.

När brandgaslagret växer, stänger det av syretillförseln till den övre delen av flamman och förbränningen blir mindre effektiv. Lagrets temperatur ökar också därför att mindre kall luft tränger in i plymen. När förbränningen ökar till följd av

högre återstrålning kommer en större del av flamman att penetrera brandgaslagret, vars sammansättning kommer att innehålla större mängder oförbrända brandgaser; samtidigt minskar syret tills lagret är helt uttömt.

Beyler /5.13/ observerade att om förhållandet mellan bränsle och luft nådde 1.7 gånger det stökiometriska förhållandet skulle brandgaslagret brinna, dock inte som en förblandad blandning av gas och luft, utan som en utveckling av flamman på ytan av brandgaslagret och luften under.

Utvecklingen av brand på ytan skapar en instabilitet med varm, brinnande gasmassa (temperaturer på 800-1000°C) på undersidan av brandgaslagret. Denna händelse kallas ibland ”**rollover**” och stimulerar blandning av varma brandgaser och luft som blandas in i brandgaslagret, se figur 5.9.



Figur 5.9, Utveckling av brand på undersidan av brandgaslagret, s.k. rollover

En effekt av detta blir att den brinnande gasen expanderar och kommer att passera ut genom öppningar och producera de externa flammorna som Hägglund /5.5/ använder som indikator på övertändning. Den andra effekten blir att  $Q_{ext}$  ökar kraftigt och troligtvis gör att allt som inte redan brinner antänds.

Detta leder, enligt ekvation 5.4, till att förbränningshastigheten ökar och **kan ses som stadiet precis innan hela rummet är involverat i branden.**

Ovanstående diskussion bygger på att det finns tillräckligt med bränsle för att öka förbränningshastigheten.

Liknande iakttagelser har observerats i försök utförda av Bengtsson et al /5.14/. Dessa försök utfördes i ett mindre rum med måtten 1.2\*0.8\*0.8 m<sup>3</sup> och öppningsfaktorn och förbränningshastigheten hos bränslet varierades för att olika ekvivalenskvoter skall erhållas. Rummet var mycket väl isolerat. Försöken finns beskrivna i appendix B och C.

Olika typer av bränsle användes, bl.a. metan, heptan, trä och plast. Under försöken mättes förbränningshastigheter, gastemperatur och massfraktion hos olika produkter. Resultaten visar, i enlighet med Beyler, att höga ekvivalenskvoter leder till att flamman inte kan existera uppe under taket utan måste söka sig neråt i rummet för att finna syre till förbränningen. Flamman brinner alltså på undersidan

av brandgaslagret. Under dessa försök var syrekonzentrationen under taket mycket nära 0 % vid höga ekvivalenskvoter.

Figur 5.10 visar hur flamman brinner på undersidan av brandgaslagret.



Figur 5.10, När ekvivalenskvoten är hög brinner flamman på undersidan av lagret /5.14/

Ju högre ekvivalenskvoten är desto större blir sannolikheten att flamman kommer att brinna på undersidan av lagret, vilket också observerats i många praktiska fall. Det är dock svårt att generalisera och säga att flamman alltid brinner på undersidan av brandgaslagret; om ekvivalenskvoten är lägre än Beylers observerade värden kan flamman eventuellt brinna högre upp i brandgaslagret. Öppningsfaktorn i rummet kan vara orsaken till att ekvivalenskvoten blir lägre om förbränningshastigheten är ungefär lika stor i de båda fallen.



Figur 5.11, När ekvivalenskvoten är lägre brinner flamman längre upp i brandgaslagret.

I fullskaleförsök utförda av Bengtsson /5.4/ observerades flammor på undersidan av brandgaslagret när öppningen i rummet bestod av ett öppet fönster. Liknande försök utfördes med dörren i rummet öppen. Det observerades då att flammorna existerade högre upp i lagret vilket troligtvis beror på en lägre ekvivalenskvot. För att styrka detta skulle det dock behöva utföras en separat testserie. Fullskaleförsöken finns beskrivna i kapitel 9.

Ett antal olika öppningsgeometrier har också provats i småskala för att man ville kontrollera var flammorna existerar; dessa försök styrker ovanstående argument. Försöken utfördes med olika bränslekonfigurationer och olika öppningsfaktorer. Bränslet var placerat både på väggar och i tak. Inga mätningar utfördes, endast videoupptagningar. Försöken finns översiktligt beskrivna i appendix I.

Att uppskatta ekvivalenskvoten under en verklig brand kan vara svårt; det är därför omöjligt att säga om flammorna kommer att befinna sig på undersidan av lagret eller inte. En avgörande faktor kan också vara hur bränslekonfiguration ser ut i brandrummet. Denna kommer att styra luftströmmarna i rummet. Om ytskiktet i taket är brännbart kommer det att bildas en bränslerik blandning närmast taket, vilket förstärker sannolikheten för att flammen skall brinna på undersidan av lagret. Det är också svårt att observera exakt var flammorna existerar i rummet då det är svårt att se flammor genom tjocka brandgaser.

*Strålningsnivån kommer att bli hög när brandgaslagret antänds, oberoende av var flammorna existerar.*

Om branden pågår lång tid kan möjligtvis luft introduceras i brandgaslagret genom att det bildas ett konvektivt flöde längs väggarna upp mot taket. För att detta skall kunna ske krävs dock att branden pågått en längre tid och värmt upp väggarna i rummet /5.15/. Detta har visats med hjälp av Computational Fluid Dynamics (CFD) beräkningar.

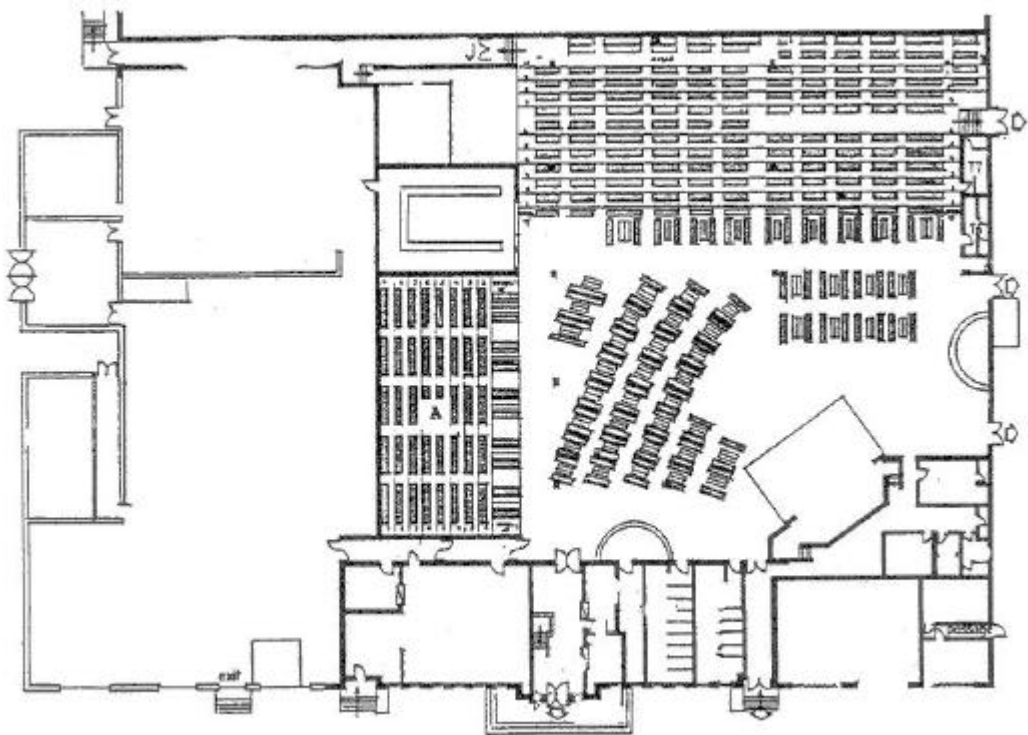
*Det är av yttersta vikt att skilja på förblandade flammor och diffusionsflammor. Under den normala övertändningsperioden är flammorna av typen diffusionsflammor /5.16/. Det är omöjligt att använda koncept rörande brännbarhetsgränser och förbränningshastigheter, som hör ihop med förblandade gaser, för att beskriva ovanstående situation.*

Det kommer att visa sig att det i andra situationer kan vara möjligt att brandgaser och luft är till stor del förblandade. Det är då mer realistiskt att tala om förblandade flammor, se vidare kapitel 6 och 7.

#### **5.4 Branden i ”The Stardust Club”, Dublin**



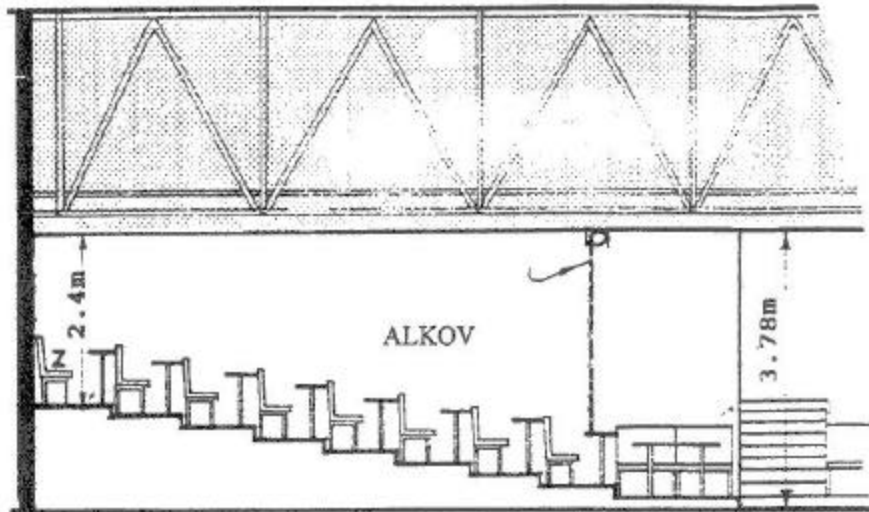
På Stardust Club, ett diskotek i Dublin, inträffade 1981 en brand med ovanligt snabbt förlopp. Branden involverade en läktare med måtten  $17 \times 10 \text{ m}^2$ , se figur 5.12. Branden började på läktaren som är markerad med ett "A" i figur 5.12 /5.11/.



Figur 5.12, Planritning av diskoteket /5.11/

Läktaren lutade uppåt mot bakväggen där höjden var 2.4m. Läktaren, som för tillfället var tom, var ofullständigt avskild från huvuddelen av dansgolvet med hjälp av en stor rullgardin, se figur 5.13.

Den västra läktaren bestod av rader med säten som var 0.9 meter breda. Sätena bestod av polyuretan med ett överdrag av PVC. Raden längst bak var placerad tätt intill bakväggen. Bakväggen hade en brännbar beklädnad och undertaket bestod av obrännbar mineralull.



Figur 5.13, Sektionsritning över läktaren /5.11/.

Branden började på bakre raden, se position z i figur 5.13. Branden spred sig snabbt längs raden. Personerna ute i den stora hallen visste vid det här tillfället att det var en liten brand i lokalen. Flammorna spred sig snabbt längs bakväggen och därefter gick brandförloppet enormt snabbt. Inom ett fåtal sekunder hade branden involverat hela läktaren som blev totalt övertänd. Brandgaser och flammor spreds ut i den stora danslokalen.

Branden rekonstruerades på Fire Research Station i England och experimentet visade att när ett säte antändes längs hela sin längd, producerades strålningsnivåer på ca  $100 \text{ kW/m}^2$  mot bakväggen.

Kombinationen av brännbara säten och brännbar väggbeklädnad möjliggjorde en effektutveckling på  $800 \text{ kW/m}$  i bakre delen av rummet. Det medförde att flammor spred sig upp under taket och på så sätt producerades höga strålningsnivåer på sätena framför. En oväntad händelse under försöken var att värmestrålningen från flammorna strax framför bakväggen steg till  $100\text{-}200 \text{ kW/m}^2$ , vilket är väldigt mycket.

*Detta resulterade i att toppen på sätena framför exponerades för värmestrålning på  $60 \text{ kW/m}^2$ . Denna strålning är tillräcklig för att orsaka antändning inom några få sekunder. Detta medförde att lokalen blev övertänd väldigt fort.*

Värt att notera i sammanhanget är att innertaket kollapsade och drog med sig en bit av yttertaket. Detta gjorde att värme- och brandgasbelastningen minskade. 48 människor omkom i denna tragiska olycka och det hade säkert blivit fler om inte taket rasat in.

*Detta exempel illustrerar hur avgörande flamspridningsprocessen är för om övertändning skall uppstå eller inte.*

## 5.5 Slutsatser

ISO definitionen för övertändning är:

*”The rapid transition to a state of total surface involvement in a fire of combustible materials within an enclosure”/5.2/*

Övertändningar uppstår i lokaler där det inledningsvis finns god tillgång på luft d.v.s. rummet har en öppning av något slag. Definitionen förtydligar att man måste nå den fullt utvecklade branden för att en övertändning skall sägas ha inträffat. En viss effektutveckling krävs för att en övertändning skall kunna uppstå, alltså en viss förbränningshastighet. Förbränningshastigheten påverkas av strålningen från flammen, de varma brandgaserna och de varma väggarna. Branden övergå oftast från bränslekontrollerad till ventilationskontrollerad när övertändningen inträffat.

Strax innan övertändningen sker antänds ofta brandgaslagret. Om ekvivalenskvoten ( $\phi$ ) är större än ca 1.7 kommer brandgaslagret troligtvis att brinna på undersidan. Detta leder till en instabilitet och mixning som gör att bränslet och luften blandas och förbränns. Om ekvivalenskvoten är lägre, t.ex. om rummet har en dörröppning istället för ett fönster, kan flammorna brinna högre upp i lagret. Det är dock svårt att visuellt uppskatta var flammorna befinner sig i en verklig situation.

Den styrande processen är en diffusionsflamma. Det är därför inte acceptabelt att använda ord som mager och fet för att beskriva en övertändning. Övertändningen har inget med förblandade gaser att göra. Man kan därför inte heller använda koncept som förbränningshastighet, brännbarhetsgränser och dylikt för att beskriva en övertändning.

Övertändning kan uppstå på ett fåtal sekunder. Det är därför viktigt att räddningstjänstpersonalen är välinformerad om fenomenet övertändning och vilka förhållande som leder till att en övertändning skapas. På så sätt kan också en nära förestående övertändning förhindras.

Kännetecknen på en nära förestående övertändning beskrivs i ett separat kapitel, se vidare kapitel 8.

## 5.6 Referenser

- /5.1/ Giselsson, K., Rosander, M., Brandkunskap, Girobrand 1993
- /5.2/ ISO/IEC Guide 52, Glossary of Fire Terms and Definitions, International Standards Organisations 1990
- /5.3/ Chitty, R., A survey of backdraft, Fire Research and Development group, Home Office 1994
- /5.4/ Bengtsson, L-G., Resultat av fullskaleförsök, Sandö, Räddningsskolan i Sandö 1997
- /5.5/ Hägglund, B., Jansson, R., Onnermark, B., Fire development in residential rooms after ignition from nuclear explosions, FOA report c2006- D6 (A3), Försvarets forskningsanstalt, Stockholm 1974
- /5.6/ McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., Harkelroad, M. F., "Estimating room temperatures and the likelihood of flashover". Fire Technology 17 98-119 18 122 (1981)
- /5.7/ Karlsson, B., Quintiere, J., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997
- /5.8/ Särndqvist, Stefan., Initial Fires, ISSN 1102-8246, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund 1993
- /5.9/ Drysdale, D.D., "The Flashover Phenomenon", Fire Engineers Journal, Nov, 1996
- /5.10/ Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, Chichester 1985
- /5.11/ Rasbash, D.J., "Major Fire Disasters Involving Flashover", Fire Safety Journal, Vol. 17, No. 2, 1991
- /5.12/ Friedman, R., "Behavior of fires in compartment", International symposium in Fire Safety of combustible materials, (Edinburgh University), 1975
- /5.13/ Beyler, C. L., "Major species production by diffusion flames in two-layer compartment environment", Fire Safety Journal, 10 47-56 (1986)
- /5.14/ Bengtsson, L-G., Experiment och modeller, Institutionen för brandteknik, LTH, Lund 1997
- /5.15 / Holmstedt, G., Zhenghua, Y., Samtal våren LTH, 1998
- /5.16/ Drysdale, D.D., Brenton, J.R., "Flames in Fires and Explosions", Fire Engineers Journal, July, 1997



## 6 BACKDRAFT

### *Inledning*

En övertändning i en byggnad uppstår i välventilerade lokaler. Med välventilerade menas att t.ex. en dörr eller ett fönster är öppet. Stor tillgång till syre medför att branden kan växa till övertändning.

I kapitel 5 har det antagits att branden kan fortlöpa obehindrat genom övertändning till fullt utvecklad brand. Om det inte skulle finnas tillräckligt med bränsle, eller om den närvarande bränslearea är otillräcklig, kommer den förbränningshastighet som kan nås vara för låg. Branden kommer då att förbli lokalt placerad och bränslet kommer att förbrukas.

Ett alternativt scenario inträffar om branden är kraftigt underventilerad, vilket innebär att syretillförseln inte räcker till för att generera den effektutveckling som behövs för övertändning. Branden kommer att utvecklas normalt, men den kommer att konsumera syre med en större hastighet än öppningen tillåter. Branden kommer att minska i intensitet; rummet kommer att kylas och frisk luft kommer att dras in och tillåta branden att "andas". Om branden kan fortsätta okontrollerat kommer bränslet så småningom att förbrukas. Om ventilationen är liten kommer branden eventuellt att självslockna.

Om branden kan pulsera eller om en glödbrand har kontinuerlig tillgång till en liten mängd syre, kan mycket oförbrända gaser samlas i rummet. Brandgaserna kan antändas om ventilationsförhållandena ändras, t.ex. genom att en dörr öppnas. Expansionen av brandgaserna kan då bli mycket snabb och resultatet blir en eldboll utanför öppningen. Detta fenomen brukar betecknas backdraft. Backdraften kan leda till en kraftig ökning av den externa strålningen till bränsleytan ( $Q_{ext}$ ) och därför leda till övertändning, se ekvation 5.4 i föregående kapitel.

Backdraften kan överraska räddningstjänstpersonalen och det är av stor vikt att kunna identifiera de situationer som kan leda till backdraft. Om backdraften sprider sig ut i ett slutet utrymme kan tryckuppbyggnaden bli mycket kraftig.

Backdraften kan t.ex. uppstå i samband med inträngning i en lägenhet eller p.g.a. att fönsterrutor spricker.

Detta kapitel ger en definition av fenomenet backdraft. Vidare beskrivs ett typiskt backdraft scenario, och då speciellt inströmningen av luft då en öppning görs. Kapitlet beskriver också vilka förhållanden som leder till att backdraft inträffar. I slutet av kapitlet ges ett praktiskt exempel.

Det finns få modeller som klarar av att beräkna en backdraft. För att resultatet skall bli bra måste fältmodeller användas. Dessa är mycket tidskrävande och behandlas inte vidare i denna rapport.

## ***Innehållsförteckning***

6.1	Definition av fenomenet backdraft .....	6-3
6.2	Ett typiskt backdraft- scenario .....	6-5
6.2.1	Tyngdkraftsstyrd strömning (Gravity current) .....	6-7
6.2.2	Antändning av den förblandade regionen.....	6-12
6.3	Förhållanden som leder till backdraft.....	6-16
6.4	Branden på ”62 Watts Street” .....	6-16
6.5	Slutsatser.....	6-19
6.6	Referenser .....	6-21

## 6.1 Definition av fenomenet backdraft

Fenomenet backdraft har ännu inte definierats av internationella standardiseringsorganisationen. De definitioner av fenomenet som används internationellt (t.ex. NFPAs, FRSs och IFEs) är dock snarlika. Begreppet backdraft används i många länder, bl.a. USA, England, Japan och Nya Zeeland.

Fire Research Station har föreslagit följande definition (översatt till svenska):

*Begränsad ventilation kan leda till att en brand producerar brandgaser som innehåller stora mängder oförbrända gaser. Om dessa samlas, kan tillförseln av luft till brandrummet, när en öppning görs, leda till en deflagration som sprider sig genom rummet och ut genom öppningen. Denna deflagration kallas "backdraft"/6.1/.*

NFPAs definition är:

*"Backdraft is the burning of heated gaseous products of combustion when oxygen is introduced into an environment that has a depleted supply of oxygen due to fire. This burning often occurs with explosive force" /6.1/*

IFE föreslår följande definition:

*"An explosion of greater or lesser degree, caused by the inrush of fresh air from any source or cause, into a burning building, in which combustion has been taking place in a shortage of air"/6.1/*

Dessa definitioner är snarlika och vilken som används är relativt oväsentligt. I vissa definitioner används ordet "explosive" vilket indikerar att en explosion skulle uppstå. Så behöver dock inte vara fallet; backdraft inträffar ofta på ett relativt lugnt sätt.

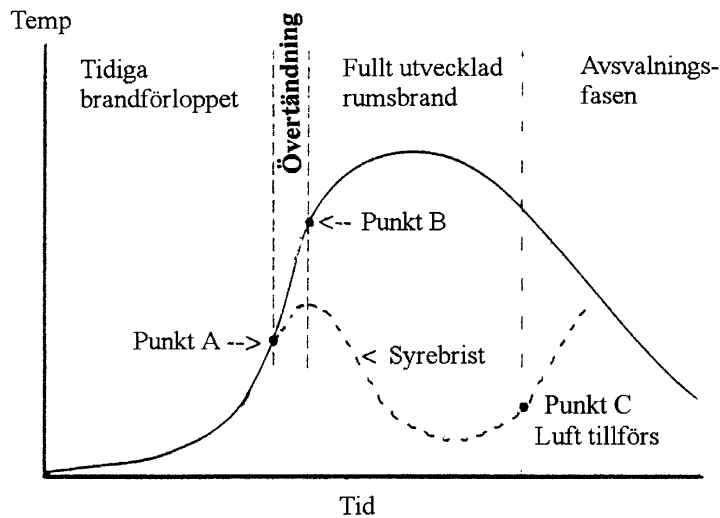
För att en händelse skall kallas backdraft måste följande moment ingå:

- Oförbrända gaser ackumuleras
- En luftrik ström kommer in
- En välblandad region av oförbrända gaser och luft uppstår
- En tändkälla antänder gaserna i den välblandade regionen
- En turbulent deflagration uppstår i rummet
- En eldboll trycks ut ur rummet

Det är viktigt att skilja på övertändning och backdraft. Övertändning uppstår oftast då det finns god tillgång på luft i rummet. Branden är bränslekontrollerad i början. När branden blir ventilationskontrollerad uppstår övertändningen. Backdraft kan uppstå då branden blir ventilationskontrollerad på ett mycket tidigt stadium,



exempelvis om rummet är stängt från början eller om det endast har begränsade öppningar.



Figur 6.1, Brandförlopp, beroende på rumsöppningar, i ett rum

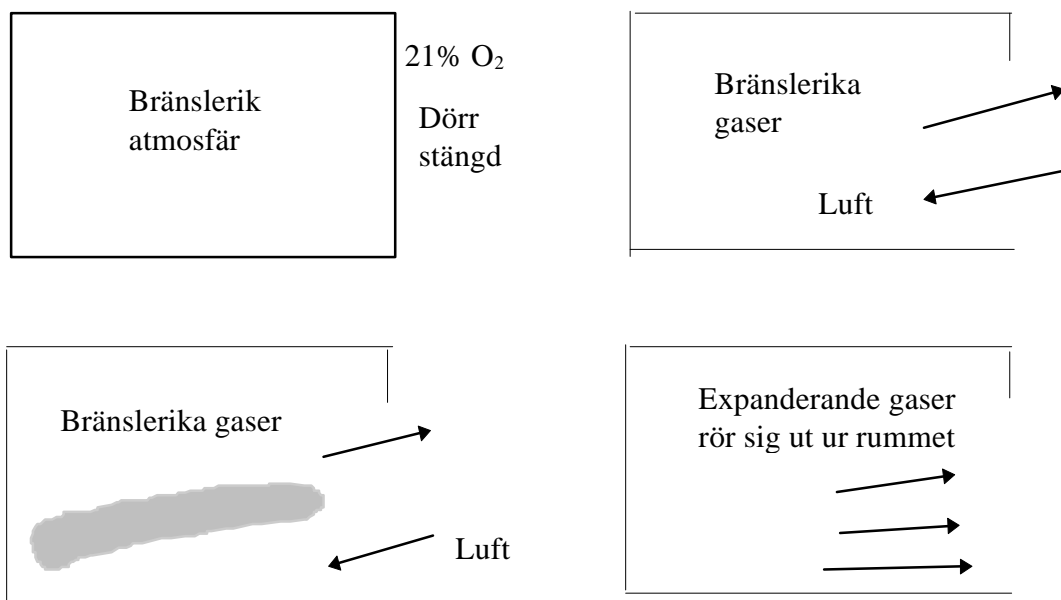
Figur 6.1 visar hur temperaturen i ett brandrum ändras med tiden. Den heldragna kurvan motsvarar en brand som växer till övertändning. Observera att övertändningen är en tidsperiod från det att branden är lokalt placerad till dess att hela rummet är involverat i branden. Öppningen tillåter i detta fall branden att utvecklas till fullt utvecklad brand. Den streckade kurvan motsvarar en brand i t.ex. ett stängt rum. När syrenivån sjunker avtar temperaturen i rummet. Om dörren till rummet sedan öppnas kan brandgaserna antändas och orsaka en backdraft, se punkt C i figur 6.1. Efter att backraften har inträffat kan hela rummet involveras i flammor, vilket leder till övertändning.

## 6.2 Ett typiskt backdraft- scenario

Ett fiktivt backdraft- scenario kan beskrivas på många olika sätt. Den generella beskrivningen som ges nedan är en kombination av bl.a. den som ges av Chitty /6.1/ och Fleischmann /6.2/.

En brand börjar i ett rum. Förbränningen sker antingen som flamförbränning eller glödbrand. Rummet har en begränsad ventilationsöppning, t.ex. normala läckageareor. Branden kommer att växa till dess att syrenivån i rummet blir begränsad. Under denna period kommer ett varmt brandgaslager att bildas under taket och sänka sig neråt. Allteftersom brandgaslagret växer kommer luften som dras in i brandplymens övre del att innehålla större mängder oförbrända gaser och mindre och mindre andel syre. Detta leder till ofullständig förbränning och brandgaslagret innehåller delvis förbrända partiklar. I takt med att effektutvecklingen minskar p.g.a. syrebrist kommer oförbrända gaser att samlas i det varma brandgaslagret. Därefter kommer branden antingen att fortgå som en glödbrand eller självslockna, beroende på bränslemängd och ventilationsöppningens storlek. Allteftersom tiden går kommer koncentrationen av oförbrända gaser att öka och det bildas en bränslerik atmosfär i rummet.

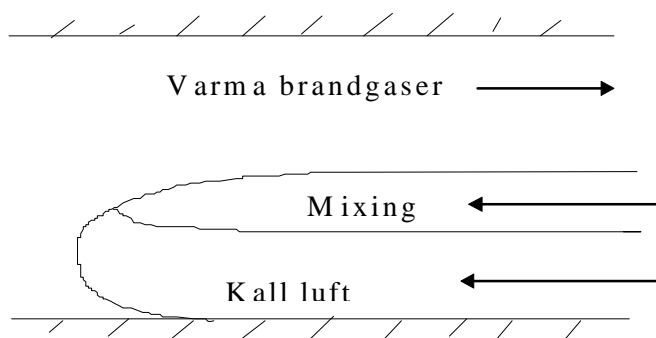
Det antas därefter att en dörr eller ett fönster öppnas i rummet. Detta kan ske t.ex. i samband med räddningstjänstens inträngande i en lägenhet eller om ett fönster spricker på grund av ojämn temperaturgradient i fönsterglaset. De varma brandgaserna kommer då att strömma ut genom öppningen och luft kommer att sugas in i den nedre delen av öppningen, se figur 6.2.



Figur 6.2, Backdraft scenario, det mörka fältet symboliserar en brännbar blandning

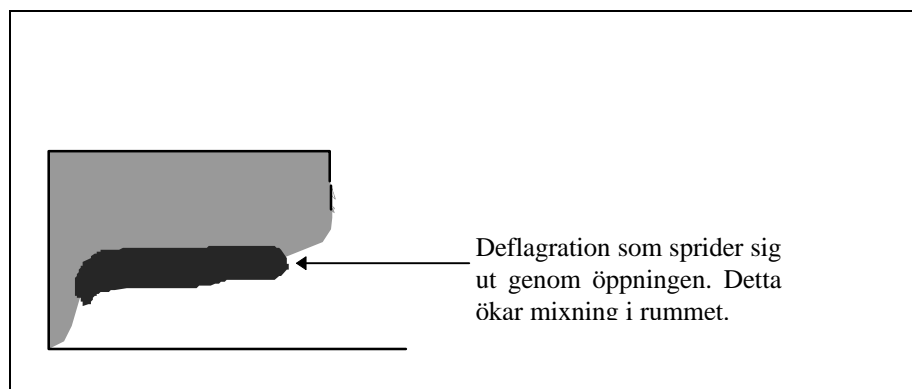
Detta inflöde av kall luft kallas tyngdkraftstyrd strömning (engelska: gravity current). När luften rör sig in i rummet blandas den med de bränslerika brandgaserna och en förblandad gasmassa bildas i en viss zon. Den turbulenta

omrörningen sker på ovansidan av luftströmmen, figur 6.3, eller på grund av den turbulens som alstras när föremål står i vägen för luftströmmen, t.ex. möbler. Figur 6.3 nedan visar den turbulenta mixningen längs med luftströmmen. Denna mixning skapar en blandning som kan ligga innanför brännbarhetsområdet, då pyrolyspanprodukterna späds ut.



Figur 6.3, En idealiserad bild av tyngdkraftstyrd strömning in i rummet

Om dessa brandgaser är inom brännbarhetsområdet och om en antändningskälla, t.ex. en flamma, glödande partiklar eller en elektrisk gnista uppstår, kommer blandningen att antändas. Figur 6.4 visar hur flammen sprider sig längs den mixade regionen.



Figur 6.4 Antändning av den förblandade regionen, motsvarande det mörka området.

Antändningen kommer att orsaka en omedelbar tryckökning när flammen utbreder sig i det förblandade skiktet. Den snabba expansionen av brandgaserna som orsakas av flammen tvingar det resterande bränslet ut genom öppningen med mycket hög hastighet och hög turbulens så att de oförbrända gaserna blandas med frisk luft. Detta resulterar i en stor eldboll som är mycket karakteristisk för backdraft. Ju mer oförbrända brandgaser det finns, desto större eldboll bildas.

Normalt behövs i storleksordningen 20-30 vol % /6.3/ oförbrända kolväten för att man skall få den karakteristiska eldbollen. Det kan verka konstigt då denna koncentration är mycket högre än den övre brännbarhetsgränsen för många ämnen; förklaringen är att koncentrationen måste vara hög för att hamna inom brännbarhetsområdet när de bränslerika gaserna späds med luft. Om koncentrationen skulle vara i storleksordningen övre brännbarhetsgränsen kommer

spädningen med luft göra att den välblandade regionen hamnar under den undre brännbarhetsgränsen /6.4/.

Processen är snarlik den som leder till förbränning av brandgaslagret under taket under den normala övertändningsperioden /6.5/. Den process som infinner sig under den normala övertändningsperioden är dock inte lika plötslig och är därför inte lika farlig för brandpersonalen.

### 6.2.1 Tyngdkraftsstyrd strömning (Gravity current)

Som tidigare nämnts kommer kall luft att strömma in i rummet om en öppning görs. De varma brandgaserna kommer att strömma ut, och den tyngdkraftsstyrda strömningen skapar en blandning inom brännbarhetsområdet. Fleischmann /6.3/ utförde ett antal experiment med saltvattenmodellering där man studerade hastigheten på den inkommande luftströmmen och vilka faktorer som påverkar den välblandade regionen.

Försöken utfördes i liten skala med olika öppningsfaktorer. Man skapade olika densitet på vätskorna genom att tillsätta olika mängder salt. En pH-indikator användes för att visualisera den region som blivit blandad av de båda vätskorna.

*Observera att även om försöken utfördes med vätskor gäller exakt samma princip för luftblandningar.*

Resultaten från vätskeexperimenten applicerades sedan på brandförsök utförda i ett rum med storleken  $1.2 \times 1.2 \times 2.4 \text{ m}^3$  och resultatet visade god överensstämmelse. Öppningsgeometrin i detta rum var densamma som i vätskeexperimenten. Resultaten går alltså att applicera på verkliga rum med liknande öppningsfaktorer.

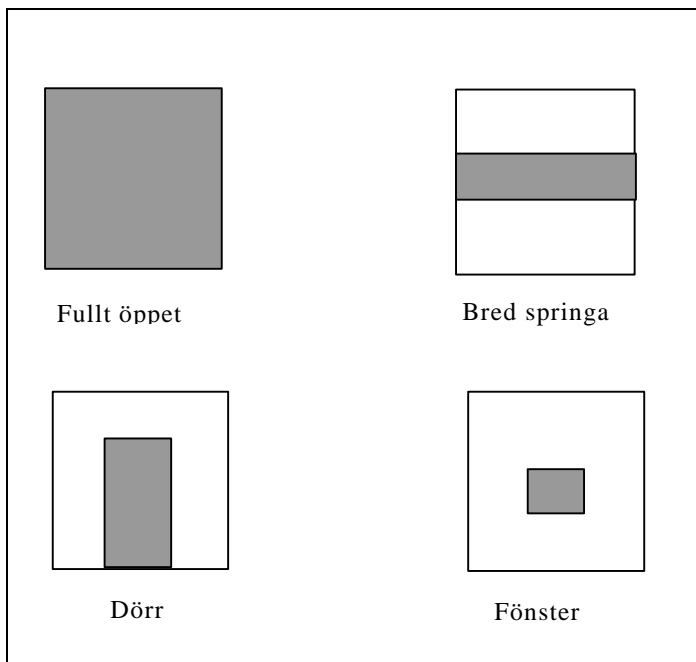
Studien visade att den dimensionslösa hastigheten  $v^*$  (se vidare sid 6-10) är oberoende av densitetsskillnaden,  $\beta$ . Man kan alltså använda resultaten på verkliga rum där  $\beta$  inte är samma som i försöken. Man fann att hastigheten hos den inströmmande luftströmmen bl.a. beror på följande faktorer:

- rummets storlek
- rummets öppningsfaktor
- densitetsskillnaden (brandgaser/luft)
- rummets höjd

Den dimensionslösa hastigheten  $v^*$  togs fram med hjälp av ett antal saltvattenförsök. Försöken utfördes med 4 olika öppningar. Rummet var av storleken  $0.15 \times 0.3 \times 0.15 \text{ m}^3$ . Följande öppningsgeometrier användes:

- helt öppet
- bred springa
- fönster
- dörr

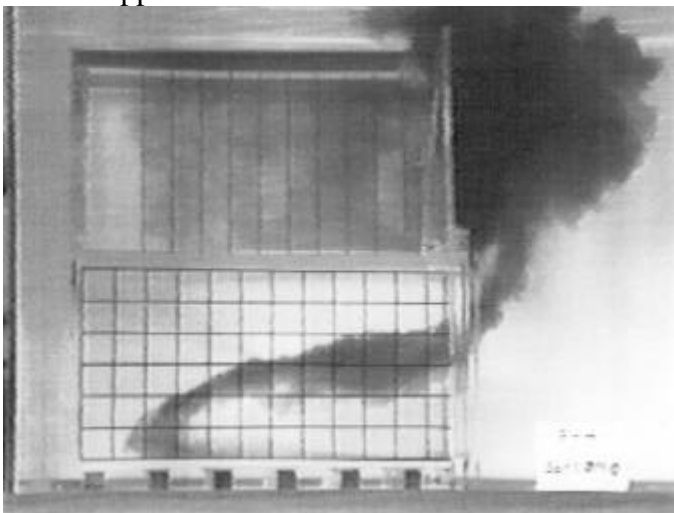
Geometrierna anges i figur 6.5 nedan som visar framsidan på rummet:



Figur 6.5. De olika öppningsgeometrierna som användes i saltvattenförsöken

Under försöken varierades  $\beta$  som är densitetsskillnaden mellan den inströmmande vätskan och den utströmmande vätskan. Resultaten visade att den dimensionslösa strömningshastigheten,  $v^*$ , för den specifika geometrin var oberoende av densitetsskillnaden. Figurerna nedan är hämtade från försök där vätskor användes men omrörningen skulle ske på samma sätt om det var gaser inblandade. Figurerna beskriver kvalitativt hur mixningen sker.

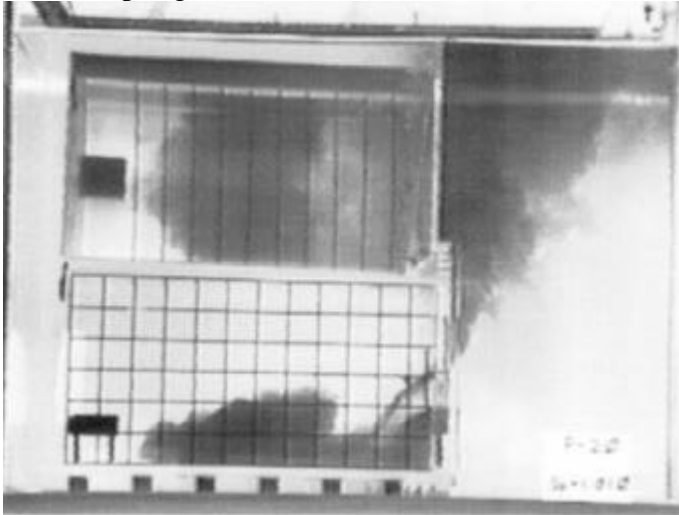
- Helt öppet



Figur 6.6. Ena sidan i rummet öppnas helt. Bilden är tagen när vattenströmmen har kommit ca  $\frac{3}{4}$  in i rummet /6.3/

Figuren 6.6 visar att det bara bildas en begränsad förblandad zon. Den är precis i skiktet mellan de båda medierna. Zonen motsvaras av det svärtade området i figuren. Inte heller när strömmen reflekterats mot bakväggen blir mixningen stor.

- Bred springa

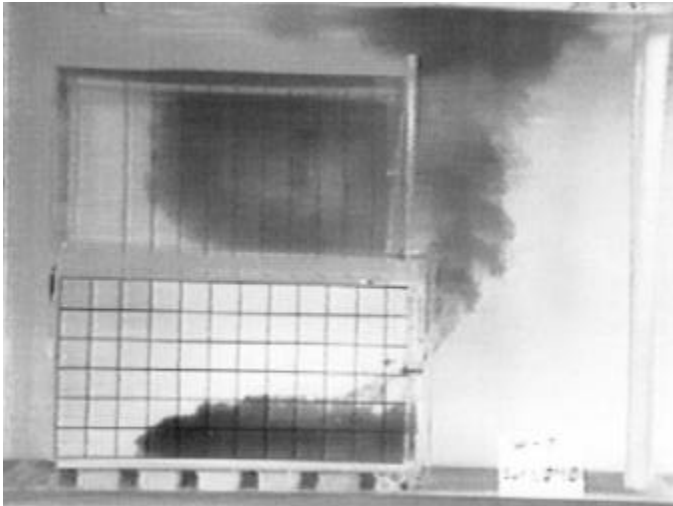


Figur 6.7, En bred springa i rummet är öppen. Denna öppning valdes för att erhålla ett mer två-dimensionellt flöde. Det är lättare att modellera ett tvådimensionellt flöde /6.3/.

Figur 6.7 ovan visar att mixningen är mycket större än då rummet öppnades helt. Detta beror på att det sker en större mixning när luftströmmen passerar skarpa kanter på sin väg i rummet. Det sker en total mixning i den nedre regionen.

*Givetvis är området mellan det bränslrika skiktet och luftströmmen mest välblandat.*

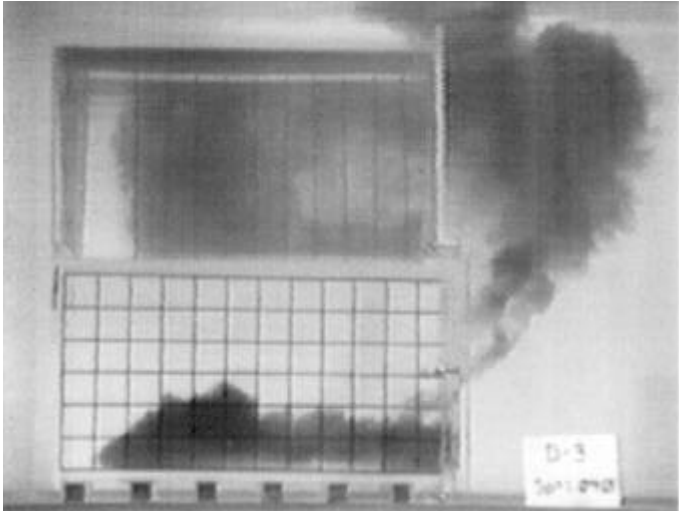
- Fönster



Figur 6.8, Fönster i rummet är öppet; fönstret är placerat mitt i öppningen och motsvarar en tredjedel av höjden /6.3/.

Figur 6.8 visar att ett stort område mixas. Om strömmen når bakväggen och vänder där kommer en mycket större del att mixas. Hela nedre delen av rummet kommer att vara välblandat. Fönstret ger en tredimensionell strömning men denna 3-dimensionella effekt är knappt märkbar efter det att strömmen har kommit in till ca  $\frac{3}{4}$  av rummets längd. Mixningen är därefter snarlik med den situation då öppningen består av en bred springa.

- Dörr



Figur 6.9, Dörr i rummet är öppet /6.3/

När dörren öppnas liknar förloppet det när fönstret öppnas. Om luftströmmen vänder mot bakväggen blir även här den blandade regionen mycket större.

*Ett fönster, en dörr eller en bred springa ger alltså liknande resultat och den stora omrörningen skapas när flödet passerar väggen in i rummet. Om strömmen får möjlighet att reflekteras mot bakväggen kommer det förblandade området att öka mycket.*

Följderna av detta kommer att diskuteras i nästa avsnitt som handlar om antändning av den förblandade gasmassan.

Ekvation 6.1 applicerades på saltvattenförsöken. Den dimensionslösa hastigheten  $v^*$  kan beräknas enligt:

$$v^* = v / (g^* h^* \beta)^{0.5} \quad \text{Ekvation 6.1}$$

där  $v$  - hastigheten hos luftströmmen  
 $g$  - tyngdkraften  
 $h$  - rummets höjd  
 $\beta$  - densitets skillnaden mellan medier  
 $v^*$ - dimensionslöst Froudes tal

Ekvationen användes på saltvattenförsöken och gav följande dimensionslösa hastigheter för de olika öppningsfaktorerna /6.3/:

$v^*$ helt öppet	= 0.44
$v^*$ bred springa	= 0.35
$v^*$ fönster	= 0.22
$v^*$ dörr	= 0.32

Dessa resultat jämfördes sedan med experimentella data från brandförsök utförda i ett rum med storleken  $1.2 \times 2.4 \times 1.2 \text{ m}^3$ . Försöken utfördes med metangas. Öppningsgeometrierna i metanförsöken var desamma som i saltvattenförsöken.

Från metanförsöken erhöles den verkliga tiden det tog för gasmassan att antända. Med hjälp av ekvation 6.1 och de dimensionslösa hastigheterna för olika öppningar beräknades den teoretiska tiden. Därefter jämfördes tiderna och resultatet var tillfredsställande.

Resultaten går bra att använda approximativt på större rum om öppningsgeometrin är snarlik. Det har undersökts av /6.6/ med godkänt resultat.

*Beräkningsexempel: Hastigheten hos den inkommande luftströmmen*

Rummets storlek är i  $2.4 \times 2.4 \times 6 \text{ m}^3$  och öppningen är en bred springa som motsvarar ungefär en tredjedel av höjden, d.v.s. 0.8 meter. Bredden på öppningen är ca 2.2 meter. Geometrin är liknande den som användes av Fleischman i metanförsöken /6.3/. Brandgastemperaturen är ca  $150^\circ\text{C}$ . Detta ger en ungefärlig brandgasdensitet på  $0.84 \text{ kg/m}^3$ . Luftens densitet är ca  $1.2 \text{ kg/m}^3$  vilket ger  $\beta$

$$\beta = (1.2 - 0.84) / 0.84 \approx 0.42$$

$$v^* = v / (g^* h^* \beta)^{0.5} \text{ vilket ger}$$

$$v = 0.35 * (9.81 * 2.4 * 0.42)^{0.5} \approx 1 \text{ m/s}$$

Detta ger enligt ekvationen ovan en hastighet på ca 1 m/s vilket också visuellt verkar vara en bra approximation. Det är viktigt att inte använda detta resultat som något exakt värde utan bara som överslagsvärden. Det kan därmed konstateras att det kan ta ett antal sekunder innan en brännbar blandning når antändningskällan, om den är placerad långt in i rummet.

Ovanstående ekvation går också bra att applicera på den utgående luftströmmen och det är viktigt att konstatera att det kan ta många sekunder innan luftströmmen, som har reflekterats vid bakre väggen, når dörröppningen igen. Blandningen i rummet kan då vara mycket väl blandad och antändningen kan därmed leda till mycket snabb effektutveckling med livsfarliga konsekvenser. Detta kommer att diskuteras i nästa avsnitt, 6.2.2.

Hastigheter i storleksordningen  $\approx 1\text{-}2 \text{ m/s}$  kan ses som schablonvärden på luftströmmen för sådana här situationer. Om temperaturen i rummet är hög kommer hastigheten att bli mycket snabbare enligt ekvationen 6.1, se densitetsskillnaden  $\beta$  (tabell 6.1).

Tabell 6.1, Luftströmmens hastighet vid olika temperatur

Brandgastemperatur ( $^\circ\text{C}$ )	$\beta$	v (m/s)
150	0.84	1.1
300	0.94	1.6
500	1.66	2.2



### 6.2.2 Antändning av den förblandade regionen

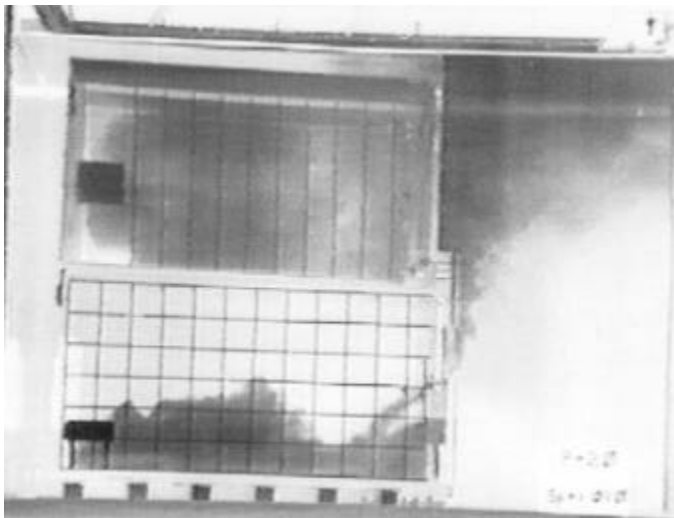
Nedanstående beskrivning förutsätter ett rum med en bred springa som öppnas efter ett tag. När springan öppnas kommer luft in i rummet och blandas med de bränslerika brandgaserna. För att antändning skall kunna ske krävs att det finns en tändkälla i den förblandade regionen. Antändningen kan ske på olika tidpunkter i förloppet:

1. När luftströmmen är på väg in i rummet
2. När luftströmmen skall lämna rummet
3. Med mycket lång fördröjning när luftströmmen lämnat rummet

Den förblandade regionen kommer att vara olika stor i dessa fall och detta medför att antändningen kommer att resultera i olika kraftiga backdraft. Tändkällan i figurerna nedan sitter längst in i rummet vid bakväggen. I verkliga fall är givetvis inte tändkällan tvunget placerad vid bakväggen utan varsomhelst i rummet.

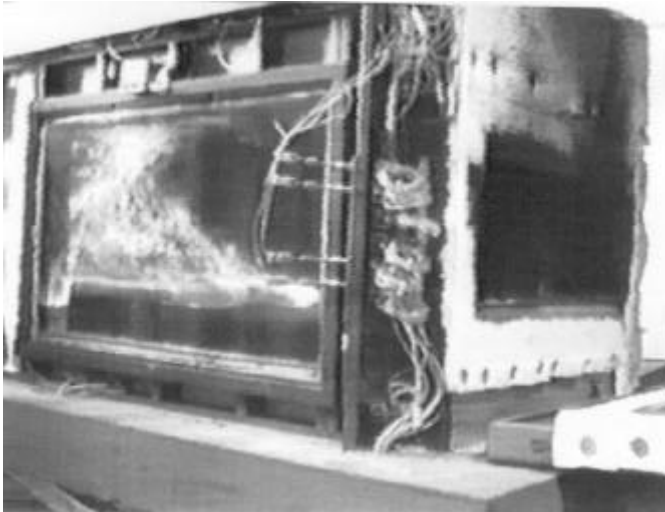
#### 1. När luftströmmen är på väg in i rummet

Om antändningen uppstår när luftströmmen är på väg in i rummet kommer en förblandad flamma att utvecklas i gränsskiktet, se figur 6.11. Den förblandade regionen kommer att utveckla en förblandad flamma. Saltvattenförsöken visar var den förblandade regionen befinner sig, se figur 6.11 nedan. Observera att bilderna endast schematiskt beskriver vad som händer.



Figur 6.11, Förblandad region när luftströmmen precis har nått bakväggen.

När de förblandade gaserna antänds kommer en turbulent förbränningsregion att finnas bakom den förblandade flaman, se figur 6.12. Denna uppstår då de varma produkterna stiger upp och pressar ner de oförbrända brandgaserna. Dessa träffar det luftrika skiktet och förbränns. Expansionen trycker ut de resterande brandgaserna genom öppningen och det är detta som skapar den karakteristiska eldbollen.

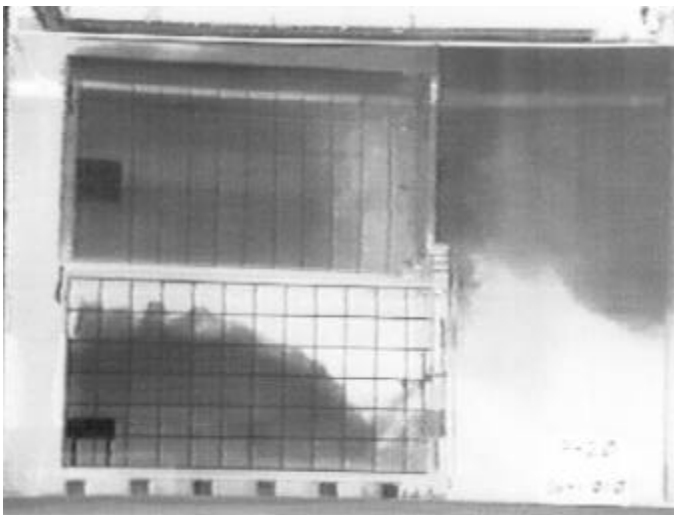


Figur 6.12, Här visas de olika typerna av flammor som utvecklas. I underkanten syns en förblandad flamma och upp mot bakväggen en diffusionsflamma /6.3/.

Ju större del av volymen som är förblandad vid antändning desto snabbare blir förloppet. Förblandade flammor och diffusionsflammor uppvisar stora skillnader när det gäller förbränningshastigheter.

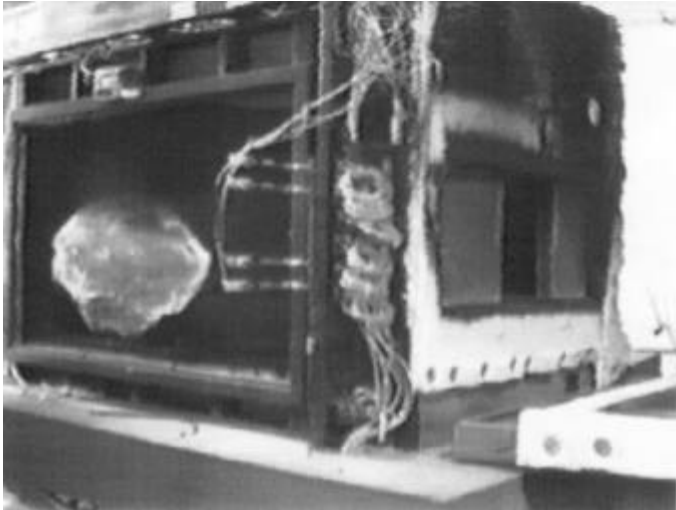
## 2. När luftströmmen skall lämna rummet

Om antändningen inte sker förrän luftströmmen har reflekterats mot bakre väggen kommer det förblandade området att vara mycket stort, se figur 6.13.



Figur 6.13, Det mörka fältet motsvarar den gasmassa som blandats väl. Som synes täcker detta nästan halva rummets volym. Observera att figuren endast är schematisk /6.3/.

Flamman kommer då att bli mer sfärisk i sin utbredning och tryckökningen blir kraftigare på grund av att en större del av gasmassan är förblandad. Ju mindre öppning rummet har desto större blir tryckökning i rummet. Flammans utbredning visas i figur 6.14 /6.3/.



Figur 6.14 Här visas att flammen är mer sfärisk i sin utbredning när antändning sker på den reflekterande luftströmmen /6.3/.

Resultatet av expansionen blir ett stort eldklot utanför rummet.

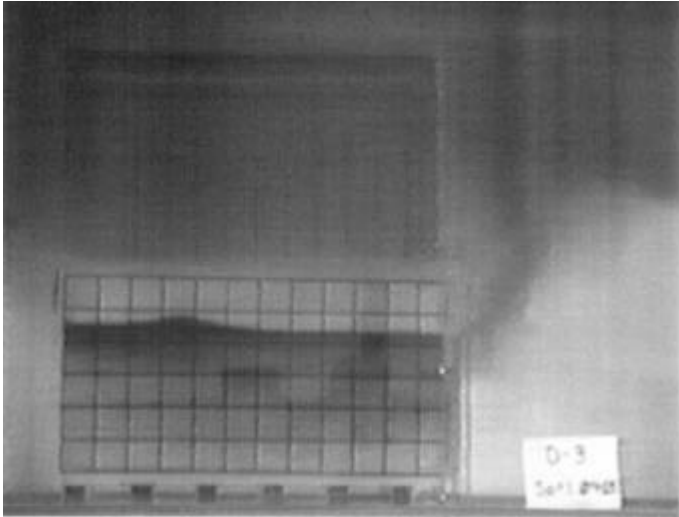


Figur 6.15, Eldklot som skapas p.g.a. expansion av de varma brandgaserna/6.3/.

### 3. Med mycket lång fördröjning då luftströmmen har lämnat rummet

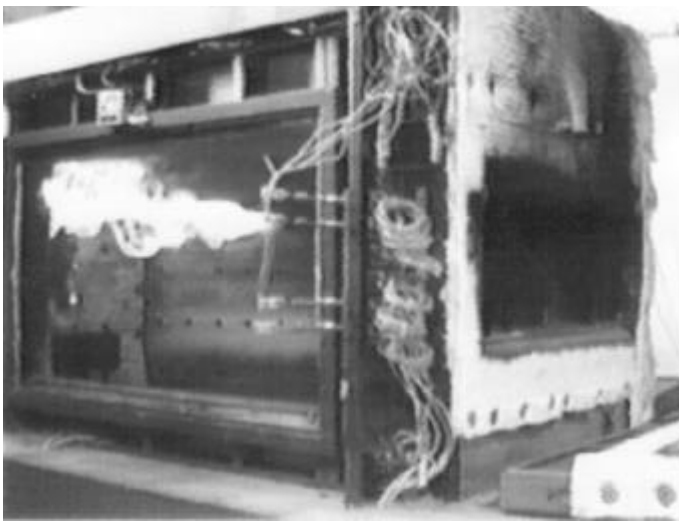
När den inkommande luftströmmen har blandats med de bränslerika gaserna och studsat mot bakväggen och därefter lämnat rummet, består nedre delen av rummet nästan enbart av ren luft. Trots detta kan det fortfarande finnas brännbara gaser ovanför dörrkarmen i rummet.

Antändning kan inträffa och deflagrationen sker i höjd med dörrkarmen. Då de brännbara gaserna är mindre i volym kommer effektutvecklingen inte att bli så kraftig. Det är dock viktigt att observera att i större lokaler, framför allt högre, kan större mängder brännbara gaser finnas och det är då stora risker involverade.



Figur 6.16, Området längst upp motsvarar bränslerika gaser och det mörka området är ett förblandat skikt /6.3/.

Fördröjningen kan vara ett antal minuter. Av de fyra öppningsgeometrierna ovan skapar fönsteröppningen de högsta trycken p.g.a. att arean är minst. Figur 6.17 nedan visar hur deflagrationen sprider sig i höjd med dörrkarmen och de resterande gaserna slungas ut ur rummet och brinner i en mindre eldboll.



Figuren 6.17, Flamman sprider sig i höjd med dörröppningen. Längre ner i rummet finns inga brännbara gaser /6.3/.

Bilderna 6.16-17 är hämtade från försök där öppningen är en bred springa. Den största tryckökningen uppstod då antändning sker medan luftströmmen är på väg att lämna rummet. Detta beror på att det förblandade området då är som störst. De högsta trycken skapas för fönsteröppningen då denna är minst. Mixningen för ett fönster, en dörr och en bred springa är snarlika.

### 6.3 Förhållanden som leder till backdraft

Att säga exakt vilka förhållanden som skapar en backdraft är en svår uppgift. Man kan dock spalta upp några av de förutsättningar som krävs för att en backdraft skall uppstå.

- Närvaron av en tändkälla

En tändkälla måste finnas inom den brännbara regionen. Oftast finns det mest brännbara området i gränsskiktet mellan det bränslerika brandgaslagret och den inströmmande luften. I många fall kan tändkällorna finnas långt ner i rummet. Det är kanske därför backdraft inte är en så vanlig företeelse.

- Bränslets placering

Ju högre upp bränslet är placerat i rummet desto mer brännbara pyrolysoxidprodukter kommer det att bildas där /6.7-8/. Givetvis är den självklara förutsättningen att det finns tillräckligt med bränsle i rummet för att uppnå den gaskoncentration som krävs för backdraft.

- Öppningarnas placering/storlek (ursprungsöppningarna)

Ju lägre ner öppningen sitter desto mindre andel av pyrolysoxidprodukterna försvinner ut genom öppningen. Om öppningen är för liten är det sannolikt att branden självslocknar. Är den för stor kommer branden att växa till övertändning direkt. Öppningen behöver därför vara lagom stor. Observera att detta gäller den öppning som finns i rummet när branden startar.

- Isoleringen i rummet

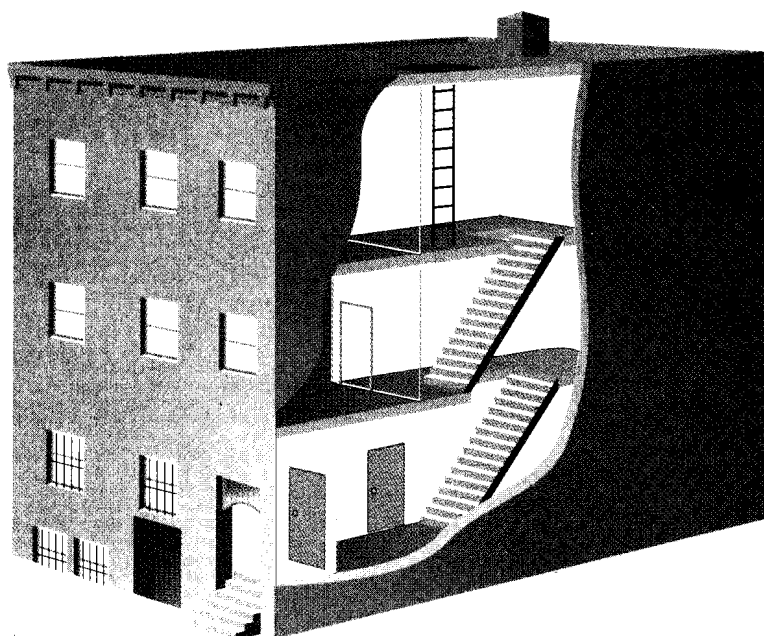
Ju bättre isolerat rummet är desto högre temperatur bildas där. Temperaturen kan också bibehållas en längre tid i rummet även om branden i det närmaste har självslocknat. Speciellt om bränslet sitter högt placerat i rummet kommer mycket oförbrända produkter att bildas. Ju lägre pyrolystemperatur bränslet har desto lättare bildas den koncentration som krävs för att backdraft skall kunna uppstå. För de flesta material krävs en pyrolystemperatur på 300°C. Koncentrationen av bränsle måste vara i storleksordning 20-30 vol %, vilket är mycket högt. Det är ovanligt att så mycket oförbrända gaser bildas /6.9/.

### 6.4 Branden på "62 Watts street"

New Yorks brandkår fick den 24 mars 1994 larm om rökutveckling från en skorsten på ett trevåningshus på Manhattan, New York /6.10/. Byggnaden innehöll fyra lägenheter, en per våning. Samtliga lägenheter hade ingång från ett gemensamt trapphus utom lägenheten i källarplanet som hade egen ingång. Byggnaden, som var från slutet av 1800-talet men nyrenoverad, ansågs vara mycket tät. I figur 6.18 visas en skiss av huset.

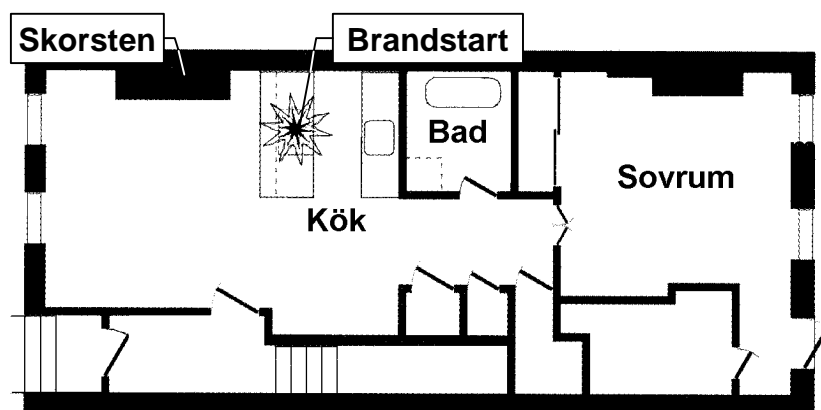
När räddningstjänsten, tre släckbilar och två stegbilar, anlände kom rök från skorstenen, men inga andra tecken på brand syntes. Personalen fick i uppgift att

öppna takluckan i trapphuset och två rökdykargrupper fick i uppgift att via samma trapphus ta sig in i lägenheterna på första (botten) respektive andra våningen. Rökdykargruppen på bottenvåningen öppnade lägenhetsdörren och noterade att luft drogs in i lägenheten. Därpå följde en varm utåtgående luftström, varefter det uppstod en backdraft med flammor som sträckte sig från dörren vidare ut i trapphuset. Flammorna sträckte sig från första våningen ända upp genom tackluckan i trapphuset och varade i 6.5 minuter. Rökdykargruppen på första våningsplanet (bottenvåningen) hann ducka och dra sig tillbaka ut genom trapphuset. Rökdykargruppen på andra våningen hade ingen reträttväg och de tre brandmännen omkom i denna backdraft.



Figur 6.18. Byggnaden på 62 Watts street. Branden var på bottenvåningen och de omkomna brandmännen befann sig på andra våningsplanet /6.10/.

Exemplet visar att försiktighet krävs även vid insatser som till det yttre ser ut att vara rutinmässiga och välkända. Det kan finnas parametrar som gör att insatsresultatet blir förödande om de vanliga åtgärderna används vid fel situationer.



Figur 6.19. Planritning över bottenvåningen till byggnaden på 62 Watts street.

Var kom då allt bränsle ifrån som kunde underhålla flamman så länge? En skiss över bottenvåningen visas i figur 6.19. Lägenhetsinnehavaren hade lämnat sin bostad omkring klockan halv sju på morgonen. Han hade placerat en soppåse på den avstängda gasspisen i köket och troligen antände spisens tändlåga påsen. Branden spred sig därefter till ett antal spritflaskor och vidare till trägolvet och annat brännbart. Dörrar och fönster var stängda; den enda källan till förbränningsluft var genom skorstenen till den öppna spisen i vardagsrummet. Det var från denna skorsten rök och gnistor upptäcktes, omkring en timme efter det att innehavaren lämnat bostaden. Till en början fungerade skorstenen som tryckavlastning och efter ett tag började rök välla ut.

Branden varade alltså länge under kraftigt underventilerade förhållanden. Denna typ av förbränning producerar en mängd oförbrända gaser i form av kolmonoxid och andra oförbrända gaser. Studier visar att när dörren till lägenheten öppnas blandas luft in och de varma oförbrända brandgaserna kan förbrännas. Det är dock ovanligt att så mycket bränsle som i detta fall ansamlas.

*Fenomenet kallas backdraught på engelska och backdraft på amerikanska, men ett svenskt ord saknas.*

Vid National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA genomfördes en datorsimulering av branden. Indata byggde dels på uppgifter från brandmännen, dels på mätningar vid brandplatsen. Vid simuleringarna kunde situationen återskapas och det visade sig rimligt att så mycket oförbrända brandgaser ansamlats i rummet att flamman kunde brinna i 6.5 minuter.

## 6.5 Slutsatser

En backdraft är en händelse som inträffar då en mängd oförbrända gaser samlats i brandgaslagret. Om t.ex. en dörr öppnas kommer en tyngdkraftstyrd luftström in i brandrummet. Den gör att en välblandad region uppstår, och detta område kan antändas om det finns någon tändkälla närvarande. Detta leder till en deflagration som sprider sig ut genom öppningen och skapar ett eldklot. Detta kallas backdraft. Backraften innefattas alltså av följande moment:

- ansamling av oförbrända brandgaser
- inflöde av luftström
- mixning av luft och brandgaser
- antändning av den förblandade regionen
- bildande av eldboll utanför lägenheten

Luftströmmen som kommer in i rummet kallas gravity current på engelska. Den förblandade regionen är ungefär lika för en dörröppning, en fönsteröppning och en horisontell öppning. Om hela väggen i rummet tas bort kommer inte mixningen att bli speciellt stor. Skillnaden i mixning beror på att mixningen blir större när strömmen passerar en skarp kant på väg in i rummet.

Om luftströmmen får vända mot bakväggen kommer det förblandade området att bli mycket större. Om antändning sker i detta läge kommer tryckökningen att bli mycket kraftigare än om antändning sker när luftströmmen är på väg in i rummet. Ett alternativt scenario inträffar om luftströmmen har lämnat rummet lång tid före antändningen. Det kan fortfarande vara så att det finns brännbara gaser ovanför dörrkarmen. I de flesta fall kommer inte denna antändning att orsaka någon kraftig backdraft, vilket helt enkelt beror på att den brännbara gasmassan är väldigt liten. I större lokaler, framför allt där avståndet mellan taket och överkanten av öppningen är stort, kan denna volym vara betydligt större. Situationen kan förefalla lugn om brandpersonal kan avancera in långt i rummet utan att notera att brandgaser kvarstår. När antändning sker blir konsekvenserna allvarliga.

Alternativt kan gaserna självantända i öppningen. Deflagrationen sprider sig då in i rummet. Detta leder inte till en lika stor tryckökning. Huruvida gaserna självantänder i öppningen eller antändning sker med hjälp av en låga inifrån rummet är svår att uppskatta. För att gaserna skall kunna självantända krävs att deras temperatur är mycket hög, ca 500-600°C.

Backdraft är en kortvarig händelse till skillnad från övertändning som tar längre tid. Den utlösande faktorn för backdraft är tillförseln av luft. För övertändning är den utlösande faktorn temperaturen i rummet, som gör att strålningsnivån i rummet ökar.

En backdraft består både av en förblandad flamma och en diffusionsflamma. I den förblandade zonen som uppstår mellan det bränslerika brandgaslagret och den inkommande luften utbreder sig en förblandad flamma. Bakom denna flamma



kommer de varma pyrolysisprodukterna att pressas neråt och blandas med det luftrika skiktet. Detta orsakar en diffusionsflamma. Skillnad i förbrännings-hastighet hos en förblandad flamma och en diffusionsflamma är mycket stor.

Backraften består till största del av en diffusionsprocess och ju mer av brandgaserna som har förblandats desto snabbare blir förloppet ut genom öppningen. Det är därför backraften blir kraftigare om antändning sker när luftströmmen har reflekterats mot bakväggen och är på väg mot öppningen. Ju mindre öppningen är desto kraftigare blir tryckökning.

Gränserna mellan en övertändning och en backdraft kan i många fall vara flytande. Detta får avgöras från fall till fall. Ett exempel är följande:

”En brand i ett rum har pågått en längre tid. Det har ansamlats oförbrända gaser i rummet och dörren till rummet öppnas. Det tar ca 20-30 sekunder innan man kan se någon flamma inne i rummet. När flammorna kommer ut genom öppningen är hastigheten låg och det bildas inget eldklot utanför rummet. Är detta en backdraft eller endast en normal övergång till den fullt utvecklade branden ?”

I de flesta situationer inträffar inte så kraftiga backdraft. Detta beror på att de bränslekoncentrationer som krävs för att backdraft skall kunna uppstå är mycket höga. Huruvida en backdraft uppstår beror bland annat på följande faktorer:

- närvaron av tändkälla
- bränslets placering
- öppningarnas placering/storlek
- isoleringen i rummet

I många praktiska fall av backdraft får olyckorna dödliga konsekvenser /6.7/, /6.11-12/. Detta kan ofta förklaras med att det är svårt att uppfatta varningssignalerna för en backdraft. Varningssignalerna för backdraft diskuteras i ett separat kapitel i rapporten.

## 6.6 Referenser

- /6.1/ Chitty, R., A survey of backdraft, Fire Research and Development group, Home Office, England 1994
- /6.2/ Fleischmann, C., Pagni, P.J., Williamson, R.B., "Quantitative Backdraft Experiments", Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS) 1994
- /6.3/ Fleischmann, C., Backdraft phenomena, University of California, NIST-GCR-94-646, 1994
- /6.4/ Gottuk, D.T., Peatross, M.J., 1995 Class B Firefighting Doctrine and Tactics: Final Report, Naval Research Laboratory, Washington DC 1996
- /6.5/ Drysdale, D.D., "The Flashover Phenomenon", Fire Engineers Journal, Nov, 1996
- /6.6/ Bolliger, I., "Full residential- Scale experiments", Fire Engineering Research report, University of Canterbury 1995
- /6.7/ Hayasaka, H., Kudou, Y., Backdraft experiments in a small compartment, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997
- /6.8/ Hayasaka, H., Kudou, Y., Burning rate in a small compartment fire, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997
- /6.9/ Millar, D.J., "Full Scale Limited Ventilation Fire Experiments", Fire Engineering Research report, University of Canterbury 1995
- /6.10/ Bukowski, R.W., "Modelling a backdraft", NFPA Journal, nov/dec 1995
- /6.11/ Croft, W.M., "Fires involving Explosions- A literature Review", Fire Safety Journal, Vol. 3, 1980
- /6.12/ Dunn, V., "Beating the backdraft", Fire Engineering/April 45-48, 1988

## 7 BRANDGASEXPLOSION

### *Inledning*

En övertändning ger inte upphov till några kraftigare tryckökningar medan en backdraft kan ge upphov till kraftiga tryckökningar om ventilationsöppningarna i rummet är små. Förutsättningen för att en backdraft skall uppstå är att ventilationsförhållandena ändras under brandförloppets gång. Ju större del av gasmassan som är förblandad innan antändning sker desto kraftigare blir tryckökningen. Vanligtvis är det bara en liten del av gasmassan som är förblandad i en backdraft situation.

I vissa situationer kan brandgaserna blandas mycket väl med luften innan antändning sker. Detta sker vanligast i utrymmen angränsande till brandrummet och utan att någon öppning tillkommer. Utrymmet har då inga större öppningar som kan tryckavlasta en eventuell antändning; deflagrationen blir mycket kraftig och kan förstöra hela byggnadskonstruktioner. Detta fenomen kallas brandgasexplosion. En brandgasexplosion är en deflagration, inte en detonation. Brandgasexplosioner kan också inträffa i brandrummet, något som dock är mer sällsynt.

I detta kapitel diskuteras vilka situationer som kan leda till att en brandgasexplosion uppstår. Vidare diskuteras hur man kan definiera en brandgasexplosion och hur höga tryck som kan bildas. Kapitlet avslutas med ett verkligt exempel.

Det finns idag få modeller som behandlar brandgasexplosion. Avancerade fältmodeller kan användas men de är enormt tidskrävande. Vissa enklare modeller behandlar enbart gasernas expansion och tar inte hänsyn till vilka gaser som finns i brandgaserna; med hjälp av dessa kan man uppskatta tryckökningen i samband med en brandgasexplosion. En sådan modell är t.ex. FREIA som har använts i kapitel 4.

### *Innehållsförteckning*

7.1 Definition av brandgasexplosion .....	7-2
7.2 Uppkomst av brandgasexplosion.....	7-2
7.3 Faktorer som påverkar hur kraftig en brandgasexplosion blir.....	7-3
7.4 Explosionen på Grand Hotel i Helsingborg .....	7-4
7.5 Slutsatser.....	7-6
7.6 Referenser .....	7-6

## **7.1 Definition av brandgasexplosion**

Begreppet brandgasexplosion finns inte definierat som en ISO-standard. Begreppet används dock i många länder och de definitioner som existerar är snarlika. Nedanstående är ett förslag /7.1/:

*” När brandgaserna läcker in i utrymmen angränsande till brandrummet kan de blandas mycket väl med luften. Denna blandning kan fylla ut hela volymen och ligga inom brännbarhetsområdet. Om blandningen antänds, av t.ex. en gnista från ett lysrör, kommer tryckökningen att bli mycket kraftig. Detta kallas brandgasexplosion. Det är sällsynt att brandgasexplosioner inträffar i brandrummet”*

En brandgasexplosion uppstår utan att någon öppning i rummet ändras. För att en backdraft skall uppstå krävs att ventilationsförhållandena i rummet ändras under brandförloppets gång. Givetvis kan gränsen mellan de båda begreppen i vissa fall vara flytande.

## **7.2 Uppkomst av brandgasexplosion**

Risken för brandgasexplosion är störst i ett rum som angränsar till brandrummet. I dessa utrymmen kan blandningen vara väl förblandad. Det enda som saknas för antändning av gasmassan är en tändkälla. Den resulterande effektutvecklingen och flamspridningen sker i en väl förblandad gasmassa vilket leder till att gasernas expansionen sker mycket kraftigare än vid övertändningar och backdraft. Tändkällan som behövs för att tända en förblandad gasmassa är mycket liten, se kapitel 4.

Ett alternativt scenario för brandgasexplosion kan eventuellt inträffa i brandrummet. Om det endast finns en liten öppning i brandrummet, d.v.s. öppningen är inte tillräcklig för att orsaka en övertändning i brandrummet, kommer branden att fortgå under syrebrist. Detta leder till att en stor mängd oförbrända brandgaser ansamlas i brandrummet. Branden i rummet kan även till synes självslockna. Om temperaturen fortfarande är hög i rummet kan mycket oförbrända gaser ansamlas i brandgaslagret, speciellt om det finns mycket brännbart material högt upp i rummet. Om rummet är välisolerat kan temperaturen vara hög under en lång tid /7.2/.

Detta kan förefalla ofarligt men efter lång tid börjar rummet att kylas och luft börjar att sugas in. Den bränslerika atmosfären blandas med luft. Syrehalten stiger upp mot ca 10 vol % som är den ungefärliga mängd som behövs för att gaserna skall kunna antändas. Gaserna i rummet har nu blandats mycket väl men de tänder inte då det inte finns någon tändkälla närvarande. Tändkällan kan uppstå senare och antända en mer eller mindre förblandad gasmassa. Explosionen blir kraftig.

Tändkällan kan vara t.ex. glöd som fladdrar upp från initialbranden. Detta kan också kallas brandgasexplosion /7.3/. Sannolikheten att tändkällan infinner sig när gasmassan är förblandad måste dock anses vara liten. Brandgasexplosioner är svåra

att förutsäga och därmed också svåra att skydda sig emot. Tyvärr får brandgasexplosioner ibland dödliga konsekvenser /7.4/.

### 7.3 Faktorer som påverkar hur kraftig en brandgasexplosion blir

Tryckökningen i utrymmet styrs av följande:

- **Ventilationsöppningens/öppningarnas storlek**  
Ju större öppningen är desto lättare tryckavlastas rummet. Om rummet är i det närmaste stängt blir trycket mycket högt om gasmassan antänds. Teoretiskt skulle tryck på upp till 8 bar kunna uppstå.
- **Andelen förblandad volym**  
Ju större del av rumsvolymen som är förblandad desto större blir tryckökningen. Det kan räcka med att ett fåtal volymprocent av brandgaserna är förblandade för att trycket skall bli mycket högt, se tidigare kapitel 4.
- **Byggnadsdelarnas trycktålighet**  
Den klenaste byggnadsdelen kommer att ge vika först; trycket kommer därefter att minska. Om byggnaden vore helt sluten och byggnadsdelarna stod emot tryckökning skulle trycket kunna bli upp till 8 bar /7.5/. I de flesta byggnader finns t.ex. fönster, vilket medför att tryckökningen oftast är måttlig. Nedanstående tabell visar ungefärliga värden för hur högt tryck olika byggnadsdelar tål:

Tabell 7.1 Trycktålighet hos olika konstruktioner /7.5/.

Typiska tryck vid vilka olika byggnadskonstruktioner förstörs		
Konstruktion	Tryck (mbar)	Tryck (Pa)
Glasfönster	20-50	2000-5000
Rumsdörrar	20-30	2000-3000
Lättväggar (trästomme och träskiva)	20-50	2000-5000
Dubbla gipsplattor	30-50	3000-5000
10 cm tegelvägg	200-350	20000- 35000

- **Förbränningshastigheten ( $S_u$ )**  
Ju större förbränningshastigheten är,  $S_u$ , desto snabbare blir expansionen.  $S_u$  är ämnesberoende och varierar också beroende på var någonstans antändning av gasmassan sker i förhållande till stökiometri. Förbränningshastigheten är högst vid stökiometriska förhållanden. En vanlig missuppfattning är att blandningen måste ligga mycket nära stökiometri för att resultera i stora tryckökningar; trycket blir mycket högt även om gasblandningen ligger nära brännbarhetsgränserna.
- **Expansionsfaktorn**

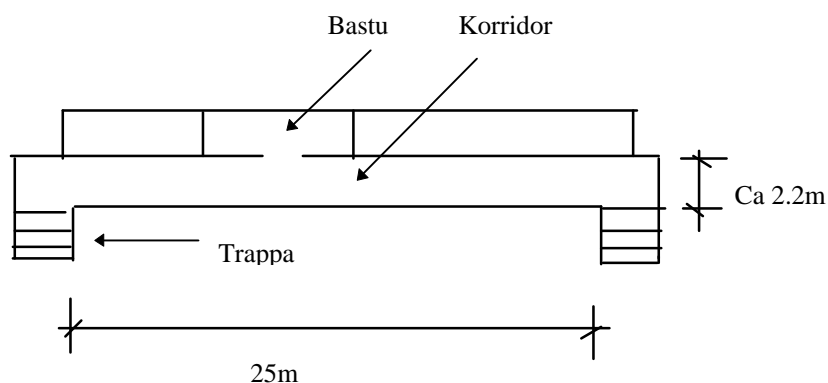
Ju högre sluttemperatur produkterna erhåller i förbränningsprocessen desto mer expanderar de. Ju mer de expanderar desto större blir tryckökningen. Produkternas temperatur beror dels på vilket ämne som deltar i förbränningen, dels på var någonstans inom brännbarhetsområdet blandningen antänds.

#### 7.4 Explosionen på Grand Hotel i Helsingborg

Brandgasexplosioner inträffar som tur är inte så ofta; branden på Grand Hotel i Helsingborg var dock en sådan olycka.

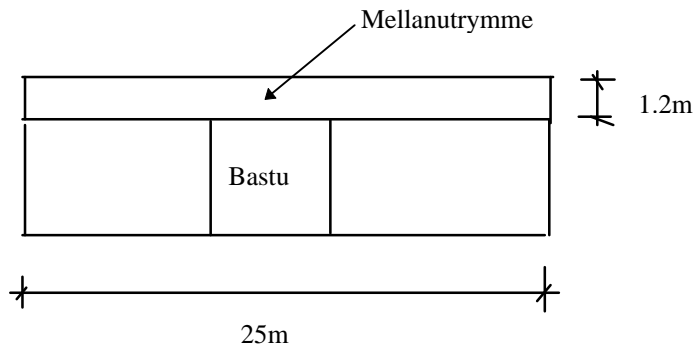
Klockan 20.39 den 12 januari 1995 inkom ett automatiskt brandlarm från Grand Hotel till Helsingborgs brandförsvår /7.6/. Någon minut efter detta inkom även telefonlarm från hotellet. Personalen tyckte att det luktade rök från konferensavdelningen. När räddningsstyrkan anlände till olycksplatsen några få minuter efter larmet hördes en kraftig explosion. Explosionen medförde att stora fönsterrutor i byggnaden krossades och glassplittret hamnade ute på gatan. Tryckvågen som skapades var således kraftig.

Utredningen som genomfördes efteråt visade att branden började i en bastu som var belägen mitt på andra våningsplanet. Bastun låg i anknäytning till en hotellkorridor, se figur 7.1. Hotellkorridoren var ca 25 meter lång.



Figur 7.1, Planritning över 2:a våningsplanet (obs figur ej skalenlig)

Branden hade orsakats av ett elfel och troligen pågått en längre tid utan att det automatiska brandlarmet hade reagerat. Bastun var avskild från korridoren med dubbla gipsskivor och dessa lyckades begränsa branden. Det var dock möjligt för brandgas att läcka ut till ett utrymme mellan undertaket och det ordinarie taket; detta utrymme fanns ovanför hotellkorridoren, se figur 7.2.



Figur 7.2, Sektionsritning över bastu (obs figur ej skalenlig)

Utrymmet var ca 2.2 meter brett och 1.2 meter högt och innehöll bl.a. ventilationskanaler. Hotellkorridoren var som nämnts ca 25 meter lång, vilket innebar att en stor volym fylldes med brandgaser. I detta utrymme fick brandgaserna möjlighet att blanda sig mycket väl med luften då det inte fanns någon tändkälla i inledningsskedet. Blandningen befann sig inom brännbarhetsområdet när den sedan antändes. Tändkällan kan möjligtvis ha varit en sticklåga från bastun.

Antändningen orsakade en kraftig **brandgasexplosion** och trycket uppskattades till ca 50-250 mbars övertryck /7.6/. Detta medförde att glassplitter sköts in i väggarna, dörrar sprängdes, fönsterrutor trycktes ut på gatan och stora delar av undertaket rasade ner. Denna typ av förbränning, d.v.s. när en större brandgasvolym antänds inom brännbarhetsområdet, ger en avsevärd tryckökning. Ju närmare stökiometri blandningen befinner sig desto större blir tryckökningen när antändning sker.

5 personer skadades vid denna brandgasexplosion, ingen dock allvarligt. Totalt fanns 32 personer på hotellet när brandgasexplosionen inträffade.

## 7.5 Slutsatser

En brandgasexplosion uppstår då en förblandad gasmassa antänds i ett rum eller ett utrymme. Det vanligaste är att det sker i ett utrymme i närheten av brandrummet. Där kan brandgaserna blandas väl. Brandgasexplosion kan också inträffa i brandrummet, men det är mer sällsynt. Hur kraftig tryckökning brandgasexplosionen orsakar beror bl.a. på följande:

- ventilationsöppningens/öppningarnas storlek
- andel förblandad volym
- byggnadsdelars trycktålighet
- förbränningshastigheten ( $S_u$ )
- expansionsfaktorn

Det bör tilläggas att det inte finns någon skarp gräns mellan en brandgasexplosion och backdraft när man jämför den tryckökning som uppstår. Backraften förutsätter dock att någon ventilationsöppning ändras. Karakteristiskt för brandgasexplosion är att brandgaserna är förblandade och tryckökningen kan därför bli mycket stor.

Under en övertändning är däremot diffusionsprocessen den styrande.

## 7.6 Referenser

- /7.1/ Bengtsson, L-G., Karlsson, B., Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion, P21-185/97, Räddningsverket, Karlstad 1997
- /7.2/ Hayasaka, H., Kudou. Y., Backdraft experiments in a small compartment, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997
- /7.3/ Hayasaka, H., Kudou. Y., Burning rate in a small compartment fire, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997
- /7.4/ Croft, W.M., "Fires involving Explosions- A literature Review", Fire Safety Journal, Vol. 3, 1980
- /7.5/ Harris, R.J., The investigations and control of gas explosions in buildings and heating plant, E and FN Spon Ltd, London 1983
- /7.6/ Personlig information, Mats Rosander, Helsingborgs brandförsvär 1996



## **8 BACKDRAFT OCH ÖVERTÄNDNING - några kännetecken**

### ***Inledning***

Under räddningsinsatser är det viktigt att kunna bedöma hur farlig den specifika situationen är. Personalens säkerhet får inte under några omständigheter sättas på spel. Speciellt utsatta är rökdykarna eftersom de ofta arbetar i en farlig miljö; rökdykarna har bl.a. till uppgift att söka efter människor i rökfyllda utrymmen. Det är viktigt att komma ihåg att förhållandena i en specifik situation kan ändras drastiskt på ett fåtal sekunder. Det är därför av största vikt att rökdykarna och den personal som jobbar utanför byggnaden är välinformerade om de kännetecken som kan indikera att en övertändning eller backdraft är nära förestående. Ibland har personalen endast ett fåtal sekunder på sig att agera.

Ofta tas brandgasernas färg som ett kännetecken på en nära förestående backdraft eller övertändning. Brandgasernas färg är dock inget tillförlitligt kännetecken. För att kunna få en bra uppfattning om när en backdraft eller övertändning är nära förestående måste man väga samman ett antal olika kännetecken.

I detta kapitel diskuteras de möjliga kännetecken som finns för övertändning och backdraft.

### ***Innehållsförteckning***

8.1 Brandgasernas färg .....	8-2
8.2 Kännetecken på en nära förestående backdraft .....	8-3
8.3 Kännetecken på en nära förestående övertändning .....	8-4
8.4 Referenser .....	8-5

## 8.1 Brandgasernas färg

Brandgasens färg används ofta som kännetecken på en nära förestående backdraft eller övertändning. Det finns egentligen ingen direkt koppling mellan hur farlig en viss situation är och vilken färg brandgaserna har.

I litteraturen /8.1/, /8.2/, /8.3/, /8.4/, /8.5/ och /8.6/ nämns bl.a. följande utseende på brandgasen som farlig:

- tjock, tung, svart brandgas; denna bildas ofta vid förbränning av kolväten och innehåller sot, vilket ger den karakteristiska färgen. Ju mer underventilerad branden är desto mer sot alstras. Sotpartiklarna är dock i sig inte lätta att förbränna.
- en snabb förändring i färgen hos brandgasen från tjock, tät och svart till gul eller grågul.
- gul brandgas; denna kommer från salpeterhaltiga och svavelhaltiga (t.ex. däckmaterial) polymerer.
- tjocka böljande moln av gul brandgas.
- vit kall brandgas; denna kommer t.ex. från glödande skumgummi.

Ovanstående är bara några exempel på kännetecken som används för brandgasernas färg. Eftersom brandgasernas densitet och färg är beroende av vilket material det är som brinner, kan inte enbart dessa parametrar användas för att förutsäga en backdraft eller en övertändning. Då brandgaserna dessutom ibland kommer att studeras på natten i olika typer av gatljus eller andra ljuskällor är det svårt att få en bra uppfattning. Kunskap behövs också om såväl brandrummets innehåll som geometri.

*Kännetecknen måste bedömas utifrån den specifika situationen och tonvikten skall inte läggas på ett enda kännetecken, exempelvis brandgasernas färg. Om man däremot väger samman ett antal kännetecken kan man få en bra uppfattning om en backdraft eller övertändning är nära förestående.*

Ett exempel som att man inte kan betrakta enbart brandgasernas färg som en varningssignal är explosionen vid "Catham Dockyard" i London /8.7/. En glödbrand i skumgummimadrasser fyllde upp hela byggnaden med brännbara pyrolysisprodukter. En explosion inträffade när man försökte ventilerade byggnaden och två brandmän omkom. Brandgaserna uppfattades som kalla och hade en **vit** färg. Man drog därför slutsatsen att de var ofarliga.

I avsnitt 8.2 och 8.3 beskrivs övriga möjliga kännetecken på en nära förestående backdraft och övertändning.

## 8.2 Kännetecken på en nära förestående backdraft

I avsnittet 8.1 diskuterades huruvida brandgasernas färg kan användas som kännetecken på en nära förestående backdraft. Enbart brandgasernas färg kan inte användas men i kombination med ett antal andra kännetecken kan man få en bra uppfattning om det är någon fara för en backdraft. Den utlösande faktorn vad gäller backdraft är luft. Nedan anges ett antal kännetecken på en nära förestående backdraft.

### Kännetecken innan brandmannen öppnar dörren till rummet:

- bränder i slutna utrymmen där ventilationen är minimal, t.ex. slutna rum eller undertaksutrymmen.
- oljiga avlagringar på fönsterglas, vilket är ett tecken på att pyrolysoxid kondenserat på kalla ytor. Tecken på underventilerad brand.
- varma dörrar och fönster som indikerar att branden pågått ett tag, kanske med begränsad ventilation.
- pulserande brandgaser från små öppningar i rummet, alltså kännetecken på underventilerade förhållande. När luften kommer in i rummet sker en förbränning, vilket gör att syret tar slut samtidigt som temperaturen stiger. Därefter sjunker temperaturen långsamt och när trycket minskat lite kan luft sugas in i rummet.
- visslande ljud i öppningar som kan relateras till brandens pulsation.

### Kännetecken när brandmannen precis har gått in i brandrummet eller tittar in i rummet:

- blå flammor observerades av Grimwood och Yu /8.8/ som en indikation på förbränning av kolmonoxid. Kolmonoxid har skapats genom en ofullständig förbränning. Ju mindre ventilation som finns desto mer kolmonoxid bildas. Blå flammor skulle också kunna härstamma från s.k. "ghosting flames", d.v.s. flammor som verkar röra sig på ett slumpartat och "spöklikt" sätt i ett underventilerat rum.
- en orange glöd eller en icke synlig brand som kännetecknar att branden pågått en längre tid med syrebrist.
- brandgas som dras tillbaka genom öppningen vilket kännetecknar att en luftström kommer in i rummet. Varma brandgaser kommer att lämna rummet, kanske genom en annan öppning, och ersättningsluft kommer att dras in genom öppningen. Det kan se ut som om brandgaserna dras mot branden.

- ”rytande” ljud som kännetecknar en inkommande luftström. Tyvärr kan det då redan vara försent för de personer som befinner sig i öppningen men andra kanske kan komma till undsättning. Visslande ljud kan uppkomma på p.g.a. att luft dras in med hög hastighet genom små öppningar /8.9/.

### **8.3 Kännetecken på en nära förestående övertändning**

Till skillnad från backdraft där den utlösande faktorn är luft är det temperaturen i rummet som är avgörande för om övertändning skall ske eller inte. Nedanstående kännetecken kan användas för att förutsäga en övertändning. Enligt avsnitt 8.1 kan också brandgasernas färg i vissa fall användas i kombination med nedanstående. Övertändningar inträffar oftast i välventilerade rum.

- Det sker en kraftig ökning av temperaturen i rummet; det ser ut som om branden ”skjuter fart”. När temperaturen stiger kommer tryckskillnaden i rummet att öka och därmed också brandgasernas hastighet ut genom öppningen. Neutrallagrets läge i öppningen, d.v.s. läget där den hydrodynamiska tryckskillnaden är noll, kommer att sänka sig neråt snabbt.
- Flammor börjar synas uppe i brandgaslagret.
- Alla brännbara ytor avger pyrolysgaser, vilket beror på att strålningsnivån i rummet ökar drastiskt. Det ”ryker” från föremål i rummet.
- Flammor börjar sprida sig längs med taket. Detta kan bero på två saker: dels att takmaterialet är brännbart, vilket ger en flamspridning längs taket, dels att flammorna från branden är längre än takhöjden. Flammorna blir då tvungna att ”vika sig” för att finna syre till förbränningen. Båda dessa situationer, då flammor breder ut sig under taket, orsakar en kraftig återstrålning till alla delar av rummet vilket gör att mer bränsle kan pyrolyseras.

Under vissa förutsättningar kommer övergången från en lokalt placerad brand till en brand som involverar hela rummets volym att gå mycket snabbt. Det har observerats under fullskaleförsök att tiden från det att situationen verkar lugn till dess att rummet är övertänt är i storleksordningen ca 15-20 sekunder /8.10/. Det är därför svårt att göra en bra uppskattning om övertändningen är nära förestående eller inte. Brandförloppet hastighet är starkt beroende av bränsletypen och bränslekonfigurationen.

## **8.4 Referenser**

- /8.1/ Chitty, R., A Survey of backdraft, Fire Research and development Group, Home Office, England 1994
- /8.2/ Hirose J., Conti C., Allen W.D., David K.D., Boogren L.G., Backdraft not to be confused with Flashover, Fire/Arson Investigation Research Paper, 1982.
- /8.3/ Yu, K.S., "Flashover and Backdraught", Fire Engineers Journal, December 1992
- /8.4/ Tokyo Fire Agency, Shinko Kairiku Transport Warehouse. Investigation Report About Deflagration, Translation for FEU 1993.
- /8.5/ "Violent Flashover at Late Stage of Warehouse Blaze", FPE Casebook of Fires, Special Report, Fire Prevention 174, p 42-43 1984
- /8.6/ Dunn, V., "Beating the Backdraft", Fire Engineering, p 45-8, April 1988
- /8.7/ Wolley, W.D., Ames, S., The Explosion Risk of Stored Foam Rubber, Building Research Establishment, CP 36/75 1975
- /8.8/ Grimwood, P.T., Fog attack, FMJ International Publications Ltd. 1992
- /8.9/ Fleischmann, C., Pagni, P.J., Williamson, R.B., " Quantitative Backdraft Experiments", Proceedings of the 4<sup>th</sup> International symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 1994
- /8.10/ Bengtsson, L-G., Resultat av fullskaleförsök, SANDÖ, Räddningsskolan i Sandö, 1997



## 9 PRAKTISK BESKRIVNING AV OLIKA SCENARIO

### *Inledning*

Som ett led i projektet utfördes ett antal fullskaleförsök i Utansjö bruk, ca en mil söder om räddningsskolan i Sandö. Till förfogande stod två rivningsfärdiga trähus, var och ett bestående av åtta snarlika lägenheter.

Syftet med försöken var att studera olika typer av brandförlopp i ett rum och framför allt att fokusera på de processer som sker i brandrummet vid övergången till fullt utvecklad brand. Tio verklighetsbaserade försök utfördes där ventilationsöppningar, initialbrand och ytskikt varierades. I vissa rum var ytskiktet brännbart. Ventilationsöppningarna varierade mellan helt stängt rum, öppet fönster och öppen dörr.

Under försöken mättes tryck och temperatur i öppningarna. Temperaturen mättes också på ett antal olika platser inne i brandrummet. Även temperaturen på fönsterrutorna mättes för att man ville studera vid vilken temperatur fönsterrutor kan antas gå sönder under ett brandförlopp.

Försöken videofilmades dels från utsidan, dels inifrån med en specialkamera som kallas "Hubert". "Hubert" är en vattenkyld kamera som är inbyggd i en mässingsmantel. Kameran skyddas av en värmefålig lins som absorberar värme. Under försöken placerades "Hubert" inne i rummet och bilderna från brandförloppet kunde studeras direkt på monter. Med hjälp av detta kan man t.ex. dra slutsatser om huruvida brandgaslagret brinner på undersidan eller inte.

Syftet med detta kapitel är att mer praktiskt beskriva de vanligaste scenarier som kan inträffa vid brand i byggnad. Som bakgrundsmaterial används data från försöken i Sandö, framförallt temperaturdata. I beskrivningarna finns hänvisningar till de tidigare kapitlen som beskriver fenomenen mer i detalj. Scenarierna valdes för att efterlikna de vanligaste typerna av lägenhetsbränder som förekommer. Försöken resulterade också i en videofilm som sammanfattar försöken.

### *Innehållsförteckning*

9.1 Försöksbeskrivning .....	9-2
9.2 Stängt rum.....	9-5
9.3 Öppet fönster .....	9-7
9.4 En backdraft-situation.....	9-10
9.5 Ventilationens inverkan på brandförloppet .....	9-12
9.6 Brandens pulsation .....	9-14
9.7 Referenser .....	9-15

## 9.1 Försöksbeskrivning

Nedan ges en beskrivning av försöksuppställningen. Temperaturen mättes med termoelement av typen K och flödet med pitorör som registrerar tryckskillnaden. Termoelementen placerades på två stålstativ som isolerades med mineralull. Dessa två stativ syns väl på de flesta foton som visas i kapitlet. Termoelementen placerades med jämna mellanrum från taket till golvet; 6 st på varje stapel ger totalt 12 st. Data från termoelementen används för att beräkna en genomsnittstemperatur på brandgaserna.

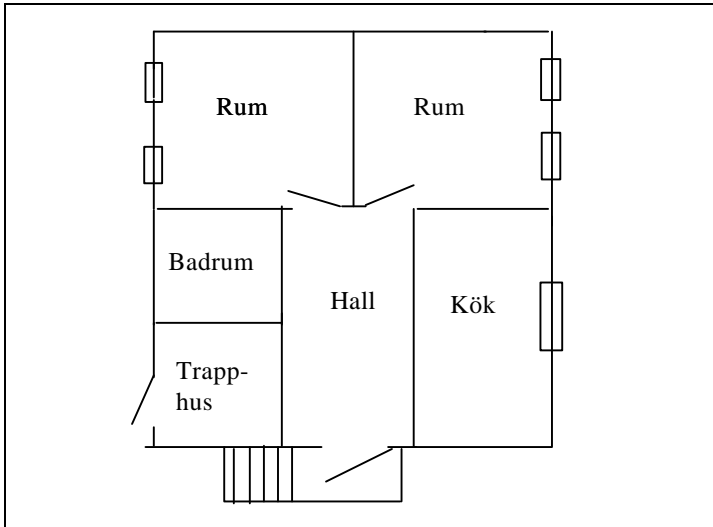
Alla resultat registrerades direkt på en mätdator i form av diagram. Försöken videofilmades med två videokameror, dels från utsidan, dels från insidan. Fullständiga försöksdata finns redovisade i rapporten "Resultat av fullskaleförsök, Sandö" /9.1/.



Figur 9.1, Ett av husen innan försöken påbörjades. Under markplan finns en källare där tre försök utfördes.

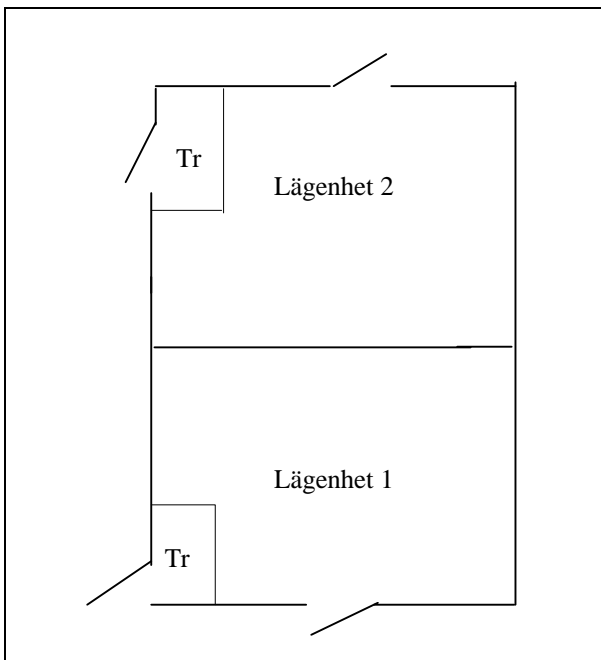
Figuren på nästa sida beskriver den typlägenhet som användes under försöken. Endast dörrar och fönster som har betydelse har ritats in. Försöken utfördes i utrymmen som betecknas med "Rum" på ritningen. I varje försök utfördes släckningsarbetet via dörren mot hallen där rökdykarna väntade på order att släcka. Arbetet försvårades av att det fanns mycket känslig utrustning som inte tål vatten, vilket medförde att rökdykarna var tvungna att arbeta med största försiktighet såväl utanför som inne i brandrummet under släckningsarbetet.





Figur 9.2, Planritning av en lägenhet på markplanet. Observera att figuren inte är skalenlig och att betydelselösa dörrar och fönster har utelämnats.

Till lägenheterna på första våningsplanet fanns två ingångar: dels trapphuset och dels ytterdörren. Lägenheterna på andra våningsplanet nåddes endast genom trapphuset som är markerat i figuren ovan.



Figur 9.3, Planritning över första våningsplanet (markplanet); Tr betecknar trapphusen.

Varje våning bestod av två identiska lägenheter (se figur 9.3) vilket ger totalt fyra lägenheter i varje hus. Andra våningsplanet såg i princip likadant ut. Trapphuset ledde upp till andra våningsplanet. I varje lägenhet fanns två rum som var lämpliga för försök, vilket totalt ger 16 rum i de båda husen. Av dessa utnyttjades inte alla; försöken var nämligen väldigt tidskrävande och arbetet begränsat till en vecka.

Tabellen nedan sammanfattar de försök som utfördes:

Tabell 9.1, Sammanfattning av de tio försök som utfördes:

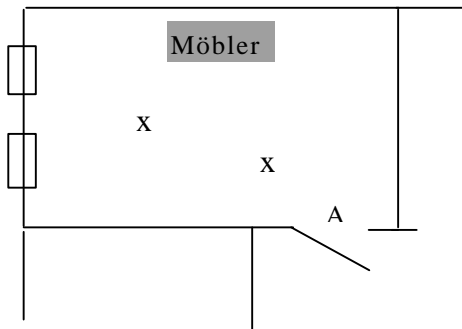
Försök Nr	Öppnings-geometri	Ytskikt	Syfte
1	Stängt rum	Gips	Går fönsterrutorna sönder?
2	Öppet fönster	Gips	Studera övertändningsperioden
3	Stängt rum	Trä	Går fönsterrutorna sönder?
4	Öppet fönster	Trä	Studera övertändningsperioden
5	Backdraft	Trä	Kommer ett eldklot ut genom öppningen när dörren öppnas?
6	Dörr öppen	Betong	Studera ventilationsfaktorns betydelse
7	Dörr öppen	Betong	Studera ventilationsfaktorns betydelse
8	Dörr öppen	Betong	Studera ventilationsfaktorns betydelse
9	Backdraft	Trä	Kommer branden att ”pulsera”?
10	Backdraft	Trä	Kommer ett eldklot ut genom öppningen när dörren öppnas?

Dessa scenarier valdes, efter ingående diskussioner med expertis inom området, p.g.a. att de ansågs vara vanligast förekommande i verkliga situationer. Med hjälp av data, framför allt uppmätta gastemperaturer och videomaterial, från dessa scenarier kan man ingående förklara vad som kan inträffa i brandrummet. Försök nr 1, 4, 7, 9 och 10 har valts. Försöken får anses vara representativa för de flesta lägenhetsbränder som inträffar i Sverige; dock kan givetvis andra situationer inträffa. Beskrivningen här kan därför inte ses som en heltäckande bild.

Följande personer deltog i försöken: Lasse Bengtsson och Sven-Ingvar Granemark, LTH, Sören Lundström och Birger Markusson, SRV, Nils Bergström m.fl., SRV Sandö.

## 9.2 Stängt rum

Utgångspunkten är att en brand börjar i ett stängt rum. Rummet kan se ut som figur 9.4:



Figur 9.4, Planritning över försöksrummet. Längst till vänster finns två fönster som är stängda. Dörren, som är markerad med ett A i figuren, var stängd under försöket.

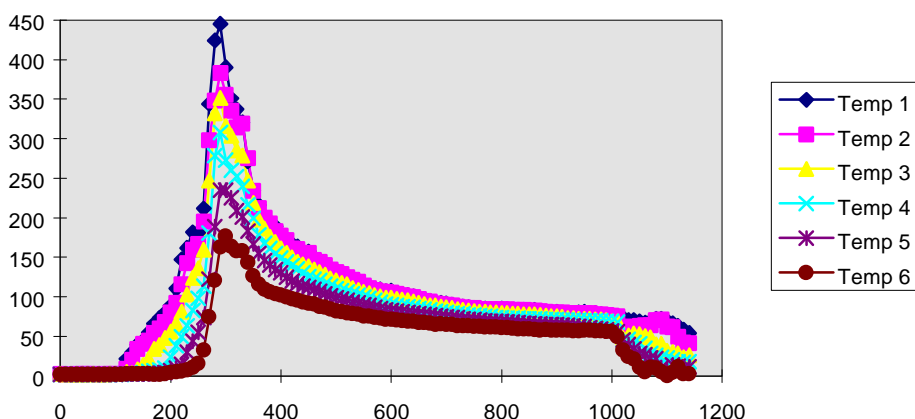
Stativen, där termoelementen sitter, är placerade enligt position x i figur 9.4. Bokstaven A markerar platsen där videokameran stod under försöket. Videokameran ("Hubert") är placerad nere vid golvet genom ett litet hål som gjorts i dörren. Hålet tätades därefter med mineralull för att undvika läckage.

Branden börjar i en soffa och antändningskällan kan vara t.ex. glöd från en cigarett. Cigaretter är en mycket vanlig tändkälla, speciellt i samband med förtäring av alkohol. Branden ökar i intensitet och flammhöjden växer. Efter ett tag har branden spritt sig till en större area av soffan och temperaturen i rummet ökar. När flammen växer i storlek ökar strålningsnivåerna till brandens ursprungsyta som också gör att intensiteten ökar ytterligare. Flamspridningen, framförallt i sidled då väggarna består av gips, ökar också.



Figur 9.5, Branden har precis börjat och flammorna sprider sig i sidled. De två staplarna i rummet utgörs av termoelementträd där termoelementen som mäter temperaturen i brandgaserna är placerade.

Brandgaslagret börjar sänka sig nedåt i rummet. Så småningom kommer syrehalten i rummet att sjunka, särskilt eftersom rummet för övrigt är mycket tätt. Förbränningen blir ofullständig när brandgaslagret sjunker ner över flammorna och minskar syretillförseln till den övre delen av flammen. När syrehalten sjunker kommer brandens intensitet i rummet att avta. Temperaturen kommer då att sjunka i rummet och därmed sjunker brandens intensitet ytterligare. Om luft tillförs kan förbränningen öka igen, men så sker inte i detta fall. Diagrammet nedan visar att gastemperaturen sjunker snabbt efter att maxtemperaturen, nästan 400°C, nåtts.



Figur 9.6, Temperaturen i brandgaserna som funktion av tiden, från ett av termoelementtråden. Temp1 sitter 30 cm under taket, Temp2 sitter 60 cm under taket o.s.v.

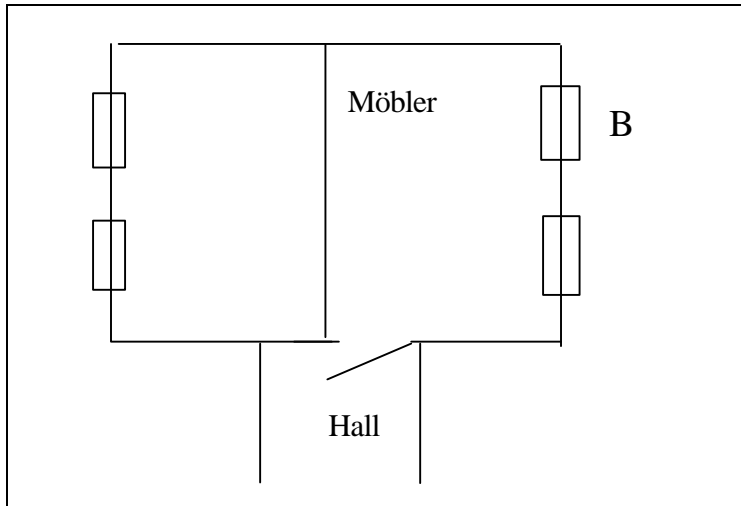
Den kritiska faktorn i detta fall var om fönsterrutorna i rummet skulle gå sönder och tillåta att ny luft kom in till förbränningen. Om fönsterrutorna spricker går antagligen branden mot en fullt utvecklad rumsbrand förutsatt att det finns tillräckligt med bränsle i rummet. Endast små sprickor i glaset observerades och det föreföll aldrig aktuellt att fönsterglaset skulle ramla ut. Fönsterrutorna sprack alltså inte och temperaturen sjönk snabbt, vilket också gör att den största delen av pyrolysen avtar. Detta gör att situationen inte är speciellt farlig när man öppnar dörren till brandrummet efter drygt 15 minuter. Mängden oförbrända gaser är inte särskilt hög.

I detta försök bestod väggarna av obrännbara gipsskivor. Om temperaturen i rummet hade varit konstant hög en lång tid efter att brandeffekten sjunkit kunde det ha ansamlats en stor mängd oförbrända gaser i rummet, framför allt om det funnits mycket pyrolyserbart bränsle i de övre delarna av rummet. Även om temperaturen i rummet inte är hög efter 15 minuter när räddningstjänsten anländer till platsen, kan det finnas mycket oförbrända gaser samlade i rummet och därmed potential för antändning av gaserna. Gasexpansionen kan då bli häftig när rökdykarna tränger in i lägenheten.

När flamfronten sprider sig ut genom en hall som inte är speciellt stor, kan tryckkuppbyggnaden bli kraftig. Förhållandena som skapar en backdraft har beskrivits i kapitel 6.

### 9.3 Öppet fönster

Förutsättningarna i detta försök är att en brand startar i ett rum vars enda öppning är ett fönster. Dörren mot trapphuset är alltså stängd. Figur 9.7 visar en planritning över rummet.



Figur 9.7, Planritning över rummet där fönstret som är markerat med ett B är det som är öppet; dock är bara halva fönstret öppet. Dörren mot hallen är stängd under försöket men visas öppen på bilden för att klargöra placeringen.

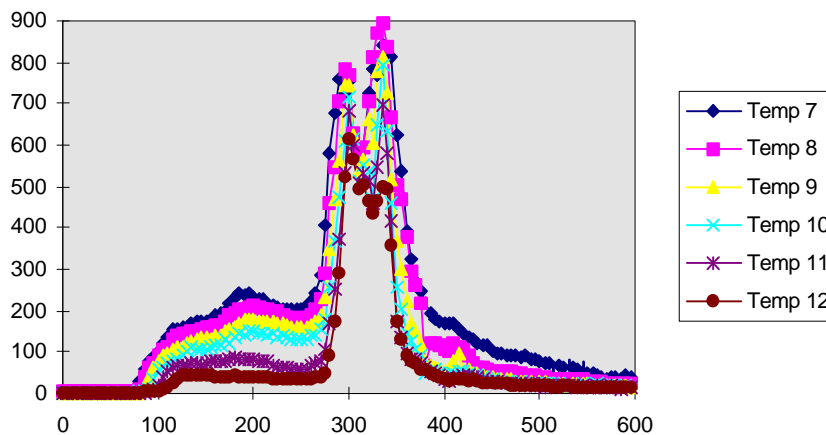
Branden börjar i soffan, t.ex. på grund av ett stearinljus som välts. Flammor sprids över materialet och brandgaserna stiger mot taket. Branden kommer att utvecklas normalt och det bildas ett brandgaslager i rummet. I fönstrets nedre del kommer luft att dras in och i den övre delen passerar de varma brandgaserna ut. Temperaturen kommer att stiga långsamt i rummet.



Figur 9.8, Flammor som sprids under taket; övertändningen är nära förestående.

Så småningom kommer strålningen från det varma brandgaslagret och de varma väggarna att bidra till att brandens intensitet ökar, vilket gör att flammor också sprids till närliggande objekt. Hela förloppet accelererar och flammhöjden ökar ännu mer. Flammorna kommer att börja sprida sig upp mot taket, och efter att de nått taket kommer brandens intensitet att öka kraftigt.

Efter det att flammorna har spridit sig under taket ökar strålningsnivåerna till de nedre regionerna i rummet kraftigt. Detta medför att de brännbara ytorna avger pyrolysgaser som kan brinna och intensiteten i rummet stiger. I diagrammet nedan visas hur temperaturen ökar när flammorna nått taket, se temperaturen efter 300 sekunder i figur 9.9, till dess att hela rummet är involverat i flammor.



Figur 9.9 Här visas hur snabbt temperaturen ökar i rummet; nr 7 sitter 30 cm från taket, nr 8 sitter 60 cm från taket, nr 9 sitter 90 cm från taket o.s.v.

Denna period kallas övertändning och i detta fall gick övertändningen på mellan 15-30 sekunder. Turbulensen i rummet skapar snabbt ett inferno. Övertändning kan sägas vara tidsperioden från det att branden är lokalt belägen till dess att hela rummet är totalt involverat i flammor. Övertändningsperioden är i detta fall mellan ca 280-300 sekunder, se figur ovan. Detta är givetvis inget exakt värde. Det är viktigt att komma ihåg att övertändning inte är en tidpunkt utan en övergångsperiod.

I kapitel 8 diskuterades kännetecknen på en nära förestående övertändning. I denna situation är förhållandena i princip helt lugna ca 15 sekunder innan hela rummet blir involverat i flammor. Det är då enormt svårt att konstatera huruvida en övertändning kan vara nära förestående eller inte. Vid en tidpunkt kan det vara acceptabelt att skicka in rökdykarna och 15 sekunder senare kan hela rummet vara ett inferno. Enligt diagrammen nås den fullt utvecklade branden mycket snabbt.

Det avgörande i denna situationen inträffar när flammorna når taket. I detta fall är också taket brännbart, vilket innebär att flammorna sprids över hela taket på ett fåtal sekunder. Strålningsnivåerna ökar därför kraftigt och pyrolyserar det mesta av brännbart material som finns i rummet. Om väggar och tak inte är brännbara går brandförloppet oftast långsammare. Bränslets placering påverkar givetvis också detta.

Figur 9.10 visar ett foto som är taget under övertändningsperioden när de första flammorna kommer ut genom rutan. Observera att det andra fönstret fortfarande är intakt.



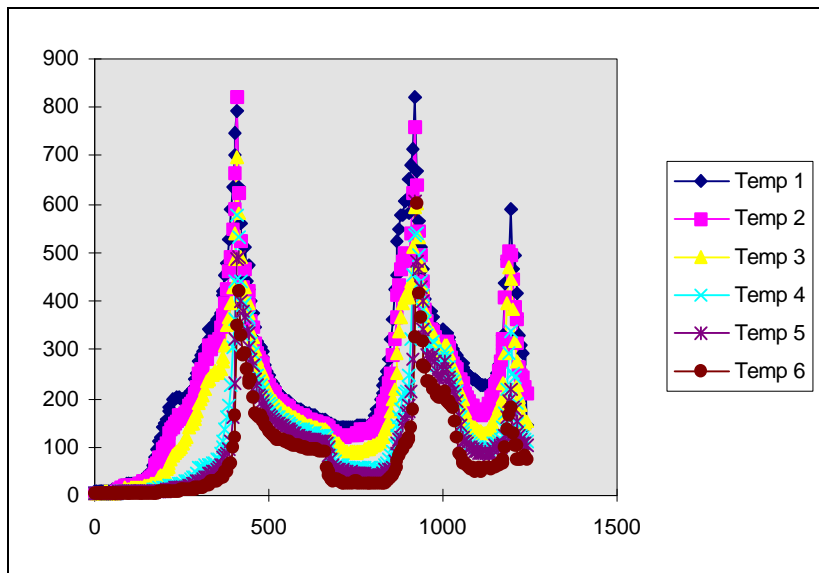
Figur 9.10, Bilden är tagen precis när flammorna slår ut genom rutorna. Rummet är nu på väg att bli övertänt efter ca 300 sekunder.

## 9.4 En backdraft-situation

I detta fall utreds en backdraft situation. Utgångspunkten är en brand som börjar i ett rum som är öppet. Det antas att det finns människor inne i huset. Branden kan fortgå lång tid innan den upptäcks. Efter ett tag märker någon att det luktar rök och hittar branden i ett rum, sovrummet. Personerna i huset har fått lära sig att man skall försöka stänga inne branden så personen i fråga stänger därför dörren till rummet, ca tre minuter efter att branden börjat.

Temperaturen är mycket hög när dörren stängs, se figur 9.11. När dörren slås igen sjunker förbränningshastigheten snabbt på grund av att det tillgängliga syret minskar. Rummet har ett relativt litet läckage så det finns knappast någon möjlighet för branden att andas.

Temperaturen i brandrummet sjunker då kraftig men är fortfarande tillräckligt hög för att orsaka pyrolys av bränsle, vilket leder till att en bränslerik atmosfär skapas.



Figur 9.11, Temperatursvariation i rummet; data hämtade från ett termoelementtråd som står nära initialbranden. Temp1 sitter 30 cm från taket, Temp2 sitter 60 cm från taket o.s.v.

Efter ett antal minuter kommer räddningstjänsten till platsen och beslutar sig för att gå in i lägenheten. De öppnar dörren och luften får möjlighet att blandas med den bränslerika atmosfären. Det bildas en brännbar blandning men ingenting händer eftersom det uppenbarligen inte finns någon tändkälla i närheten av en denna. Antändningen kommer först efter ett tag och sprider flammorna med hög hastighet ut genom dörröppningen. Detta kan vara förödande, speciellt om rökdykarna har avancerat in i brandrummet utan att observera de potentiella riskerna.

Flamfronten pressas ut genom det smala trapphuset och orsakar ett eldklot utanför ytterdörren. Speciellt situationen då eldklotet fångas in i ett yttre utrymme är mycket farlig. Gasernas expansion orsakar att trycket stiger och detta kan medföra att hela byggnadskonstruktioner raseras.



Givetvis hade situationen i verkligheten inte blivit likadan om rökdykarna kylt brandgaserna med vatten innan de gick in i rummet.



Figur 9.12, Flamfronten är på väg ut genom öppningen. Rökdykarna måste hålla en låg ställning.

Figur 9.12 visar flamfronten som passerar ut genom öppningen och en rökdykare som påbörjar släckning av rummet. Dörren på bilden är ytterdörren vilket innebär att hela hallen är fylld med flammor. I vissa situationer, då det samlats stora mängder oförbrända gaser, kan antändningen orsaka mycket större eldklot utanför öppningen. Detta kan medföra en allvarlig fara för rökdykarna. Flamfronten kan då fylla upp hela öppningsarean och rökdykarna löper stor risk att bli allvarligt skadade.

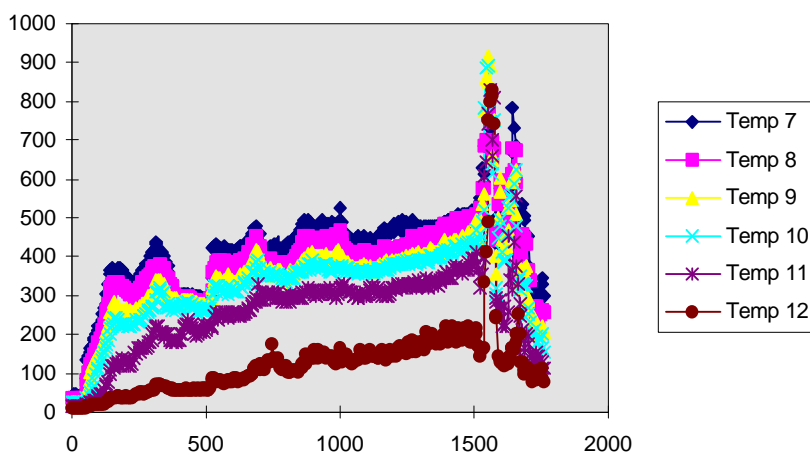
## 9.5 Ventilationens inverkan på brandförloppet

I detta fall studeras ventilationens inverkan på brandförloppet. Brandrummet är beläget i källaren och har måtten 4.5 \* 7\* 2 m. Omslutande material består av betong och branden börjar i en soffa. Öppningen är i detta fall endast en halv dörr, se figur 9.13. Branden utvecklas under lång tid, ca 15 minuter, men rummet blir inte övertänt. För att studera inverkan av en större ventilationsarea beslutades att man skulle öppna upp mer av dörren och observera vad som hände. Figur 9.13 visar brandgaserna som strömmar ut genom öppningen innan denna utökats.



Figur 9.13, Brand i källaren där rummets öppning, en dörr, är öppen från början.

Diagrammet nedan visar att temperaturen är relativt konstant i rummet en längre tid. Den ligger strax under 500°C och är helt enkelt inte tillräcklig hög för att orsaka en övertändning i rummet. När dörren öppnas mera, efter ca 1500 sekunder, stiger temperaturen och övertändningen inträffar.



Figur 9.14, Temperaturens förändring med tiden. Temp7 sitter 30 cm under taket, Temp8 sitter 60 cm under taket o.s.v.

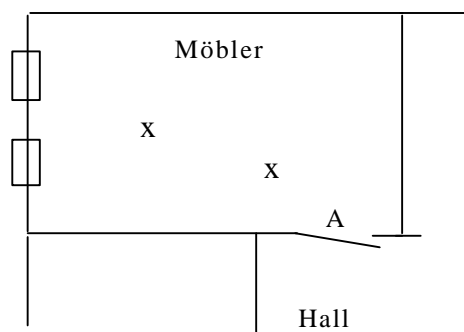
Efter det att dörren öppnats stiger temperaturen till ca 700- 800°C. Rummet blir övertänt. Under den fullt utvecklade branden stiger temperaturen sakta och det är vanligt med temperaturer på 900-1000 °C.

Bränslets placering styr givetvis också brandförloppet. Om bränslet placerats på ett annat sätt skulle säkerligen brandförloppet också blivit annorlunda. I detta fall måste det också konstateras att betongen tar upp värme och om det hade varit mineralull i den omslutande konstruktionen skulle förhållandena varit annorlunda. Materialet i den omslutande konstruktionen har således stor inverkan på brandförloppet. Detta har diskuterats i kapitel 2.

## 9.6 Brandens pulsation

Om brandrummet har små öppningar kan detta ibland leda till att branden står och pulserar. För att kunna studera detta fenomen tilläts endast en liten öppningen vid golvnivå i ett för övrigt stängt rum. Denna öppning var av storlek  $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ . Branden startade i en soffa och tilläts växa till dess att syrehalten sjunkit.

Efter det att branden har vuxit i intensitet kom effekten att avta på grund av syrebrist.



Figur 9.15, Öppningen på  $0.2 \times 0.2$  sitter längst ner på dörren A i figuren. För övrigt är rummet stängt.

Detta fall beskriver situationen då brandrummet har små öppningar. Om temperaturen i rummet är relativt hög kan bränsle fortsätta att pyrolyseras; när syret tar slut i rummet kommer förbränningen att avta och temperaturen i brandrummet sjunker. Trycket i brandrummet sjunker, vilket medför att det skapas ett undertryck. Detta medför att ny luft kan sugas in i brandrummet och skapa en brännbar blandning. Denna blandning uppfyller dock oftast endast en liten del av rumsvolymen.



Figur 9.16, Gaserna expanderar ut genom öppningen.

Om det finns någon tändkälla närvarande kan gaserna antändas. Detta medför att trycket i rummet ökar när gaserna expanderar kraftigt och gör att dessa trycks ut genom öppningen. Detta illustreras av det stora vita molnet i figuren. Därefter kan en ny ”cykel” börja.

Samtidigt som detta sker tar luften slut i rummet och förbränningen avtar. Branden kan stå och pulsera på det sättet om ventilationen och bränslemängderna tillåter det. Det hela kan leda till att bränslet så småningom tar slut eller att det byggs upp mycket oförbrända brandgaser i rummet. Om brandrummet sedan öppnas kan antändningen orsaka en kraftig expansion av brandgaserna, d.v.s. det inträffar en backdraft.

Hastigheten hos de utströmmande gaserna är givetvis beroende av hur mycket gas som trycks ut genom öppningen och hur stor denna öppning är. Ju mindre öppningen är desto större hastighet har gaserna när de passerar ut genom öppningen.

I sällsynta fall kan en större brandgasvolym blandas med luft, speciellt om det inte finns någon tändkälla närvarande. Det är dock sällsynt i brandrummet men har inträffat i verkligheten. Trycket blir då mycket högt om öppningen inte tillåter tryckavlastning. Expansionen av gaserna kan då förstöra hela byggnadskonstruktioner. Detta fenomen kallas brandgasexplosion och behandlades utförligt i kapitel 7.

## ***9.7 Referenser***

/9.1/ Bengtsson, L-G., Resultat av fullskaleförsök SANDÖ, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997

## 10 SAMMANSTÄLLNING AV BEGREPP

Syftet med detta kapitel är att sammanställa de viktigaste begrepp som har använts i rapporten.

Det kan konstateras att de tre fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion är nära besläktade och att det i vissa gränsfall kan vara svårt att klart skilja det ena fenomenet från det andra; en backdraft kan resultera i en övertändning; en underventilerad brand kan resultera i en kraftig backdraft, vilket möjligtvis kan kallas för brandgasexplosion o.s.v. Det viktiga är att man förstår skillnaden i de kemiska processer som styr fenomenen. För varje fenomen finns ett antal olika förslag på definition. De flesta är dock snarlika och vilken som används är egentligen av mindre betydelse.

### ***Övertändning***

Det finns ett antal definitioner av begreppet övertändning. De är dock snarlika. Vanligast är de definitioner som anges dels av den internationella standardiseringsorganisationen (ISO), dels av Fire Research Station.

ISO-definitionen av övertändning är följande:

*”The rapid transition to a state of total surface involvement in a fire of combustible materials within an enclosure”*

Definitionen betonar dock inte att övergången bibehålls vilket är ett av kännetecknen för övertändning. Fire Research Station har därför valt att förtydliga detta genom följande definition (översatt till svenska):

*”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” .*

Båda dessa definitioner betyder ungefär samma sak och vilken som används är relativt oviktigt. I denna rapport används den sistnämnda eftersom den är tydligast.

## **Backdraft**

Fire Research Station har föreslagit följande definition (översatt till svenska):

*Begränsad ventilation kan leda till att en brand producerar brandgaser som innehåller stora mängder oförbrända gaser. Om dessa samlas, kan tillförseln av luft till lägenheten när en öppning görs leda till en deflagration som sprider sig genom rummet och ut genom öppningen. Denna deflagration kallas "backdraft".*

NFPA:s definition är:

*"Backdraft is the burning of heated gaseous products of combustion when oxygen is introduced into an environment that has a depleted supply of oxygen due to fire. This burning often occurs with explosive force"*

IFE föreslår följande definition:

*"An explosion of greater or lesser degree, caused by the inrush of fresh air from any source or cause, into a burning building, in which combustion has been taking place in a shortage of air"*

Dessa definitioner är snarlika och vilken som används är relativt oviktigt. I vissa definitioner används ordet "explosive" vilket indikerar att en explosion skulle uppstå. Så behöver dock inte vara fallet; backdraft inträffar ofta på ett relativt lugnt sätt.

## **Brandgasexplosion**

Termen brandgasexplosion finns inte definierad som en ISO-standard. Begreppet brandgasexplosion används dock i många länder och de definitioner som existerar är snarlika. Nedanstående är ett förslag :

*" När brandgaserna läcker in i utrymmen angränsande till brandrummet kan de blandas mycket väl med luften. Denna blandning kan fylla ut hela volymen och ligga inom brännbarhetsområdet. Om blandningen antänds, av t.ex. en gnista från ett lysrör, kommer tryckökningen att bli mycket kraftig. Detta kallas brandgasexplosion. Det är sällsynt att brandgasexplosioner inträffar i brandrummet"*

I många fall kan gränsen mellan en backdraft och en brandgasexplosion vara flytande. Det viktiga är dock att ordet "explosion" bara kan användas då gasernas termiska expansion förhindras.

## 11 SLUTSATSER

Detta kapitel sammanfattar de viktigaste delarna i rapporten. Beskrivningen nedan sker i enlighet med de huvudkapitel som finns i rapporten och bygger på slutsatserna i varje kapitel.

### *Allmänt om brandförlopp*

Faktorer som påverkar brandförloppet är dels fysiska faktorer i form av byggnadens uppbyggnad och rumsgeometri, dels typen av bränsle och dess placering. Då en viss brandsituation är beroende av en mängd faktorer som är individuella för den enskilda byggnaden är det inte relevant att ange ett brandförlopp som representerar en viss byggnadstyp, t.ex. industrier eller publika lokaler.

Byggnadens utformning styr brandförloppet genom några viktiga underparametrar som närvaron av väggar och tak, öppningar mot det fria och intilliggande utrymmen samt omslutande materials termiska egenskaper. Även inverkan av aktiva system, i form av sprinkleranläggning och brandgasventilation, påverkar brandförloppet.

En annan viktig parameter är givetvis det brännbara materialet i rummet. Mängden och typen av brännbart material i den lösa inredningen är självfallet av stor betydelse och styr till stor del brandtillväxten. Mycket i inredningen i form av porösa och träbaserade material bidrar till snabba brandförlopp.

### *Fysikaliska faktorer*

Antändning hör intimt samman med flamspridning som kan betraktas som en serie antändningar. Det är flamspridningen som avgör i vilken takt energiutvecklingen och produktionen av giftiga gaser sker, speciellt om bränslet är placerat på väggar och tak. Flamspridningshastigheten är beroende av ett flertal faktorer, bl.a. materialets värmeupptagningsförmåga, den omgivande miljön och ytans orientering.

För ett material med stor värmeupptagningsförmåga (oftast material med hög densitet) blir flamspridningshastigheten vid dess yta relativt långsam. Därför blir flamspridningen över ytan hos ett tungt material i regel lägre än hos ett lätt.

Om materialet har föruppvärmts av exempelvis en varm omgivande gasmassa, kan materialet uppnå antändningstemperaturen relativt snabbt. Förvärmade ytor orsakar därmed en snabbare flamspridning.

Ytans orientering och den riktning flamman sprider sig i är av mycket stor vikt för flamspridningshastigheten. Det är främst den vertikala, uppåtriktade flamspridningen samt flamspridningen längs undersidan av takmaterialet i ett rum



som kan orsaka en snabb, exponentiell brandtillväxt. Uppåtriktad flamspridning, där densitetsskillnaden och luftflödet driver flammen uppåt, gör att flammen från det brinnande materialet föruppvärmer den del av materialet som inte börjat pyrolyseras. För vissa material leder detta till en exponentiell flamspridningshastighet och värmeutveckling.

Flamspridningen längs undersidan av taket i ett rum beror delvis på att luftflödet tvingar flammen framåt, men också på att takytan har föruppvärmts kraftigt av de varma brandgaserna som samlas vid taket. Detta kan, som i fallet ovan, leda till exponentiell brandtillväxt.

Horisontell och nedåtriktad flamspridning på den nedre delen av väggarna i ett rum sker i mycket långsammare takt och blir oftast inte kritisk för materialet på den nedre delen av väggarna värmts upp rejält och branden i rummet närmar sig övertändning. På detta stadium kan dock även horisontell eller nedåtriktad flamspridning orsaka en snabbt ökande värmeutveckling.

### ***Kemiska processer***

I brandgaslagret sker en rad komplexa processer som kan leda till att brandens intensitet ökar. Om branden är kraftigt ventilationskontrollerad kommer oförbrända brandgaser att följa med plymen upp i brandgaslagret. Energin i brandgaslagret kan utvinnas om proportionerna mellan bränsle och luft är riktiga samtidigt som en tändkälla är närvarande. Om energin i brandgaslagret frigörs kommer strålningsnivån i rummet att öka kraftigt, vilket kan leda till övertändning.

Halten oförbrända gaser i brandgaslagret är starkt förknippad med ekvivalenskvoten,  $\phi$ , som är ett mått på förbränningshastigheten i förhållande till mängden inblandad luft. Med hjälp av  $\phi$  kan man uppskatta hur höga halter av  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HC$  o.s.v. som finns.

Om brandgaslagret antänds kan flammor av två slag uppkomma:

- *Förblandade flammor, där bränslet och luften har blandats före antändningen.*
- *Diffusionsflammar, där syret diffunderar in i bränslet.*

I de flesta inomhusbränder är gasmassan inte förblandad. Istället kommer en diffusionsflamma att utvecklas i brandgaslagret.

En diffusionsflamma uppstår i gränsskiktet mellan bränsle och luft. Därför kan inte begrepp som *mager* och *fet* eller koncept rörande förbränningshastighet användas för att beskriva en diffusionsflamma.

Om diffusionsprocesserna dominerar i brandgaslagret kommer inte expansionen av gaserna att ske lika häftigt och förloppet är enklare att kontrollera; tryck-ökningen i rummet blir inte lika kraftig.

Om gasmassan är förblandad före antändning kommer tryckökningarna att bli kraftiga om rummets öppningar inte är tillräckliga för att tryckavlasta rummet. Det räcker med att en mindre del av den totala rumsvolymen är förblandad vid antändning för att tryckökningen skall bli mycket stor. Ju större öppningsfaktorn är desto mindre blir tryckuppbyggnaden, och ju mer energi gaserna innehåller desto högre blir förbränningshastigheten.

I brandsammanhang används ofta orden *mager* och *fet* för att beskriva brandgaslagrets sammansättning. Dessa begrepp förutsätter att gasmassan är förblandad och missbrukas tyvärr ofta.

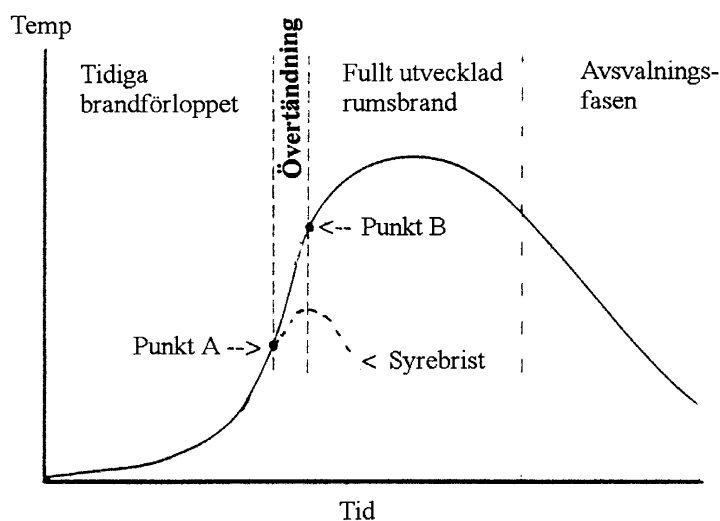
## Övertändning

Övertändningar i byggnader orsakar ibland människors död. Det är därför viktigt att känna till vilka faktorer som orsakar övertändningar. Det är speciellt viktigt för de personer som skall bekämpa rumsbränder. Räddningstjänstpersonal måste ha grundläggande kunskap om de faktorer som påverkar rumsbrandens utveckling, d.v.s. de faktorer som gör att en brand växer mot övertändning.

Fire Research Station definierar övertändning enligt följande:

*”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” .*

Av definitionen följer att övertändning inte klassificeras som en mekanism utan som en övergångsperiod, beroende av ett antal mekanismer, var och en bidragande till att initialbranden växer till en fullt utvecklad brand, se figur 11.1.



Figuren 11.1, Brandförloppet i ett rum.

Det är viktigt att betona att övertändning inte antas ha inträffat förrän den fullt utvecklade branden har inträffat. Punkt A i figuren kan motsvara situationen då flammorna nått taket i ett rum. Punkt B motsvarar tiden då den fullt utvecklade branden har nåtts. Tiden mellan A och B kan i vissa speciella fall vara kort, endast ett fåtal sekunder. Övertändning kan sägas vara tidsperioden från det att branden är lokalt belägen till dess att hela rumsvolymen är involverad i flammor.

Denna beskrivning förutsätter att branden är bränslekontrollerad till en början, d.v.s. att det finns god tillgång på luft. När övertändningen inträffar övergår branden till att bli ventilationskontrollerad i nästan alla fall. En del av de pyrolysisprodukter som finns inne i rummet kan inte förbrännas där p.g.a. syrebrist. Dessa kommer då att brinna utanför rummet, vilket brukar synas i form av flammor.

Ett mycket stort antal fullskaleexperiment, som utförts både i Sverige och internationellt, har visat att det för att en övertändning skall kunna inträffa, krävs att branden överstiger en kritisk nivå som mäts i form av avgiven värmeeffekt (kW). Storleken hos denna är främst beroende av rummets storlek, väggarnas termiska egenskaper och ventilationsarean.

Den värmeeffekt som krävs för övertändning kan omräknas till en förbränningshastighet från bränsleytan. Vilka processer i brandrummet är det då som gör att förbränningshastigheten ökar till den kritiska nivån, d.v.s. den nivå som behövs för att övertändning skall kunna uppstå? Detta beskrivs av nedanstående ekvation:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_f + \dot{Q}_{ext} - \dot{Q}_{loss}}{L_v} A \quad \text{Ekvation 11.1}$$

där  $\dot{m}$  är förbränningshastigheten i g/s,  $\dot{Q}_f$  är värmeövergången från flammen till den brinnande ytan (kW/m<sup>2</sup>) och A är bränslearean i m<sup>2</sup>.  $\dot{Q}_{ext}$  är strålningen från den omgivande delarna till bränsleytan (kW/m<sup>2</sup>).  $\dot{Q}_{loss}$  motsvaras av den energi som leds in i materialet utan att direkt användas till att förångna nytt material. Efter ett tag då materialet har blivit mättat kommer denna att minska.  $L_v$  (kJ/g) är förångningsvärmets, d.v.s. den värmemängd som behövs för att 1g gas skall lämna bränsleytan. Förångningsvärmets antas ofta vara en materialkonstant men är, för många material, starkt relaterad till materialets temperatur.

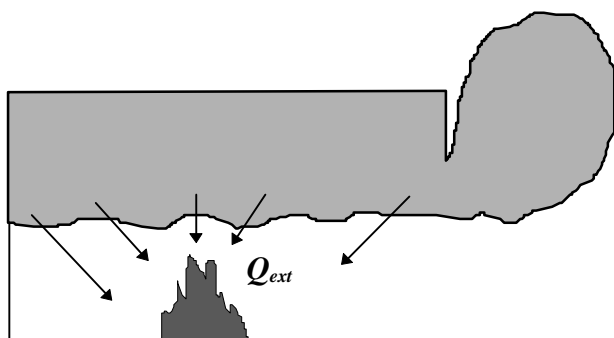
Det är två grundläggande mekanismer som leder till att övertändning kan uppstå:

- Flamspridning och antändning (initialbrandens area ökar)
- Ökad intensitet av förbränningen på en bestämd bränsleyta

Dessa två mekanismer är sedan var för sig beroende av tre olika processer som är nära knutna till varandra, nämligen:

- $Q_{\text{loss}}$  (den energi som når bränslet men som inte används till förångning)
- $Q_f$  (värmén från flammen)
- $Q_{\text{ext}}$  (strålningen från omgivande områden)

Förbränningen av brandgaslagret är helt klart karakteristisk för övertändningsprocessen. De processer som kan ske i gaslagret, om det innehåller oförbrända brandgaser, kan leda till förbränning som i sin tur kan leda till en kraftig ökning i  $Q_{\text{ext}}$  och därmed till övertändning. Brandgaslagret brukar antändas strax innan övertändningen äger rum.



Figur 11.2 Strålningen från brandgaserna ökar.

När flammen växer i storlek, nås ett stadium där flamtoppen penetrerar brandgaslagret och slår i taket.

När brandgaslagret växer stänger det av syretillförseln till den övre delen av flammen och förbränningen blir mindre effektiv. Lagrets temperatur ökar också eftersom mindre kall luft tränger in i plymen. När förbränningen ökar till följd av högre återstrålning kommer en större del av flammen att penetrera brandgaslagret, vars sammansättning kommer att innehålla större mängder oförbrända brandgaser; samtidigt minskar syret tills lagret är helt uttömt.

Om förhållandet mellan bränsle och luft når ca 1.5-2.0 gånger det stökiometriska förhållandet kommer brandgaslagret att brinna, dock inte som en förblandad blandning av gas och luft, utan som en utveckling av flammen på ytan av brandgaslagret och luften under.

Utvecklandet av brand på ytan skapar en instabilitet med varm, brinnande gasmassa (temperaturer på 800-1000°C) på undersidan av brandgaslagret. Denna händelse kallas ibland "rollover" och stimulerar blandningen av varma brandgaser och luft som blandas in i brandgaslagret.

Ju högre ekvivalenskvoten är desto större blir sannolikheten att flammen kommer att brinna på undersidan av lagret, vilket också observerats i många praktiska fall. Det är dock svårt att generalisera och säga att flammen alltid brinner på undersidan av brandgaslagret. Om ekvivalenskvoten är lägre än 1.5-2.0 kan flammen eventuellt brinna högre upp i brandgaslagret. Öppningsfaktorn i rummet kan vara orsaken till

att ekvivalenskvoten blir lägre om förbränningshastigheten är ungefär lika stor i de båda fallen.

Att uppskatta ekvivalenskvoten under en verklig brand kan vara svårt; det är därför omöjligt att säga om flammorna kommer att befinna sig på undersidan av brandgaslagret eller inte. En avgörande faktor kan också vara hur bränslekonfiguration ser ut i brandrummet. Denna kommer att styra luftströmmarna i rummet. Om ytskiktet i taket är brännbart kommer det att bildas en bränslerik atmosfär närmast taket, vilket förstärker sannolikheten att flammen skall brinna på undersidan av brandgaslagret. Det är också svårt att observera exakt var flammorna existerar i rummet då det är svårt att se flammor genom tjocka brandgaser.

*Strålningsnivån kommer att bli hög när brandgaslagret antänds, oberoende av var flammorna existerar.*

Den process som styr utvecklingen är en diffusionprocess. Det är därför inte acceptabelt att använda ord som mager och fet för att beskriva en övertändning. Övertändningen har inget med förblandade gaser att göra. Man kan därför inte heller använda koncept som förbränningshastighet, brännbarhetsgränser och dylikt för att beskriva en övertändning.

Övertändning kan uppstå på ett fåtal sekunder. Det är därför viktigt att räddningstjänstpersonalen är välinformerad om fenomenet övertändning och vilka förhållanden som leder till en övertändning. På så sätt har räddningstjänstpersonalen större möjlighet att förhindra en nära förestående övertändning.

### ***Backdraft***

En övertändning uppstår i välventilerade lokaler. Med välventilerade menas att t.ex. en dörr eller ett fönster är öppet. Stor tillgång till syre medför att branden kan växa till övertändning.

Om det inte skulle finnas tillräckligt med bränsle, eller om bränslearean är otillräcklig, kommer förbränningshastigheten att vara för låg. Branden kommer då att förbli lokalt belägen och bränslet kommer att förbrukas.

Ett alternativt scenario inträffar om branden är kraftigt underventilerad, vilket innebär att syretillförseln inte är otillräckligt stor för att generera den effektutveckling som behövs för övertändning. Branden kommer att utvecklas normalt, men den kommer att konsumera syre med en större hastighet än öppningen tillåter. Branden minskar i intensitet, rummet kyls och frisk luft kommer att dras in och tillåta branden att andas. Om branden kan fortsätta okontrollerat kommer bränslet så småningom att förbrukas. Om ventilationen är liten kommer branden eventuellt att självslockna.

Om branden kan andas kan mycket oförbrända gaser samlas i rummet. Dessa kan antändas om ventilationsförhållandena ändras, t.ex. genom att en dörr öppnas.

Expansionen av brandgaserna kan då bli mycket snabb. Detta fenomen brukar betecknas backdraft. Backraften kan leda till en kraftig ökning av den externa strålningen till bränsleytan ( $Q_{ext}$ ) och därför leda till övertändning, se ekvationen 11.1.

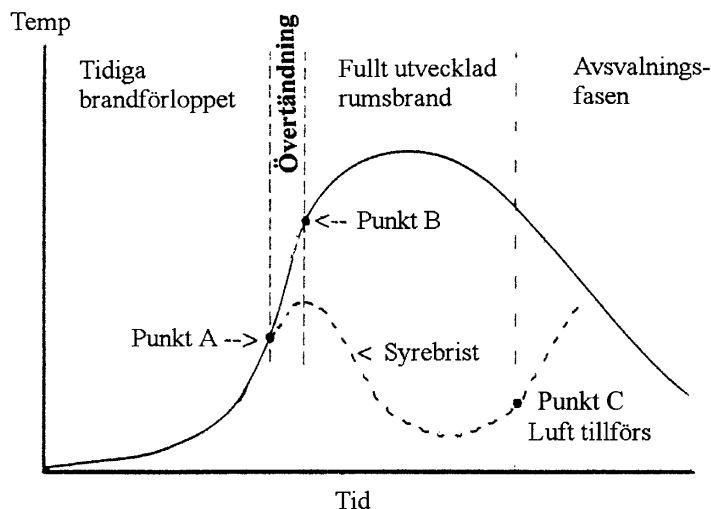
Backraften kan överraska räddningstjänstpersonalen och dödsfall har förekommit. Det är viktigt att kunna identifiera de situationer som kan leda till att backdraft uppstår. Om backraften sprider sig ut i ett slutet utrymme kommer tryckuppbyggnaden att bli mycket kraftig. Backraften kan t.ex. uppstå i samband med inträngning i en lägenhet eller p.g.a. att fönsterrutor spricker.

Fire Research Station har föreslagit följande definition av fenomenet backdraft (översatt till svenska):

*Begränsad ventilation kan leda till att en brand producerar brandgaser som innehåller stora mängder oförbrända gaser. Om dessa samlas, kan tillförseln av luft till brandrummet när en öppning görs leda till en deflagration som sprider sig genom rummet och ut genom öppningen. Denna deflagration kallas "backdraft".*

För att en händelse skall kallas backdraft skall följande moment ingå:

- Oförbrända gaser ackumuleras.
- En luftrik ström kommer in.
- En välblandad region av oförbrända gaser och luft uppstår.
- En tändkälla antänder gaserna i den välblandade regionen.
- En turbulent deflagration uppstår.
- En eldboll uppstår utanför rummet.



Figur 11.3, Brandförlopp, beroende på rumsöppningar, i ett rum.

Figur 11.3 visar hur temperaturen i ett brandrum ändras med tiden. Den heldragna kurvan motsvarar en brand som växer till övertändning. Observera att övertändningen är tidsperioden från det att branden är lokalt placerad till dess att hela rummet är involverat i branden. Öppningen tillåter i detta fall branden att utvecklas till fullt utvecklad brand. Den streckade kurvan motsvarar en brand i t.ex. ett stängt rum. När syrenivån sjunker avtar temperaturen i rummet. Om dörren till rummet sedan öppnas kan brandgaserna antändas och orsaka en backdraft, se punkt C i figuren. Efter det att en backdraft inträffat kan hela rummet involveras i flammor, vilket leder till övertändning.

Om det finns en bränslerik atmosfär i brandrummet när t.ex. dörren öppnas kommer luften in och blandas med brandgaserna. Den engelska termen för luftströmmen som kommer in i rummet är "gravity current". Den förblandade regionen är ungefär lika stor för en dörröppning eller en fönsteröppning. Om hela väggen i rummet tas bort kommer inte mixningen att bli speciellt stor. Skillnaden i mixning beror på att mixingen blir större när strömmen passerar en skarp kant på väg in i rummet.

Om luftströmmen får vända mot bakväggen innan antändning sker kommer det förblandade området att bli mycket stort. Om antändning sker i detta läge kommer tryckökningen att bli mycket kraftigare än om antändning sker när luftströmmen är på väg in i rummet.

Ett alternativt scenario inträffar om luftströmmen har lämnat rummet lång tid före antändning. Det kan fortfarande vara så att brännbara gaser finns ovanför dörrkarmen. I de flesta fall kommer inte denna antändning att orsaka en kraftig backdraft, något som helt enkelt beror på att den brännbara gasmassan är liten. I större lokaler, framför allt där avståndet mellan taket och överkanten av öppningen är stort, kan denna volym vara betydligt större. Situationen kan förefalla lugn och räddningstjänstpersonalen kan avancera långt in i rummet utan att notera att brandgaser finns kvar. När antändning sker blir konsekvenserna allvarliga.

Alternativt kan gaserna självantända i öppningen. Deflagrationen sprider sig då in i rummet. Detta leder inte till en lika stor tryckökning. Huruvida gaserna självantänder i öppningen eller antändning sker med hjälp av en låga inifrån rummet är svårt att uppskatta. För att gaserna skall kunna självantända krävs att deras temperatur är mycket hög, ca 500-600°C. Det är sällan brandgaserna är så varma att de självantänder i öppningarna.

Backdraft är till skillnad från övertändning en kortvarig händelse. Den utlösande faktorn för backdraft är tillförseln av luft. Den utlösande faktorn för övertändning är brandgasernas temperatur, som påverkar strålningsnivån i rummet och därmed också bränslets förbränningshastighet och effektutveckling.

En backdraft består både av en förblandad flamma och en diffusionsflamma. I den förblandade zonen, som uppstår mellan det bränslerika brandgaslagret och den inkommande luften, utbreder sig en förblandad flamma. Bakom denna flamma

kommer de varma pyrolysisprodukterna att pressas neråt och blandas med det luftrika skiktet. Detta orsakar en diffusionsflamma. Skillnaden i förbrännings-hastighet hos en förblandad flamma och en diffusionsflamma är mycket stor.

Backraften består till största del av en diffusionsprocess och ju mer av brandgaserna som har förblandats desto snabbare blir förloppet ut genom öppningen. Det är därför backraften blir kraftigare om antändning sker när luftströmmen har reflekterats mot bakväggen och är på väg mot öppningen. Ju mindre öppningen är desto kraftigare blir tryckökningen. Gränserna mellan en övertändning och en backraft kan i många fall vara flytande.

I de flesta backraft-situationer blir inte tryckökningen så kraftig. Detta beror på att de bränslekoncentrationer som krävs för att backraft skall kunna uppstå är mycket höga.

Backraft kan i enstaka fall leda till svåra olyckor. Detta kan ofta förklaras med att det är svårt att uppfatta varningssignalerna för en backraft.

Att säga exakt vilka förhållanden som skapar en backraft är en svår uppgift. Man kan dock spalta upp några av de faktorer som påverkar uppkomsten av backraft:

- tändkällan
- bränslets placering
- öppningarnas placering (ursprungsöppningarna)
- isoleringen i rummet

### ***Brandgasexplosion***

I vissa situationer kan brandgaserna blandas mycket väl med luften innan antändning sker. Detta sker vanligen i utrymmen angränsande till brandrummet och utan att någon öppning tillkommer. Utrymmet har då inga större öppningar som kan tryckavlasta en eventuell antändning. Deflagrationen blir då mycket kraftig och kan förstöra hela byggnadskonstruktioner. Detta fenomen kallas brandgasexplosion. En brandgasexplosion sker genom deflagration, inte detonation. Brandgasexplosioner kan också inträffa i brandrummet, men det är mer sällsynt.

En brandgasexplosion uppstår utan att storleken på någon öppning i rummet ändras medan en backraft kräver att ventilationsförhållandena i rummet blir annorlunda. Givetvis kan gränsen mellan de båda begreppen i vissa fall vara flytande.

Sannolikheten för brandgasexplosion är störst i ett rum som angränsar till brandrummet. I dessa utrymmen kan blandningen vara väl förblandad. Det enda som saknas för antändning av gasmassan är en tändkälla.



Ett alternativt scenario med brandgasexplosion kan eventuellt inträffa i brandrummet. Om det endast finns en liten öppning i brandrummet, d.v.s. öppningen inte är tillräcklig för att orsaka en övertändning i brandrummet, kommer branden att fortgå under syrebrist. Detta leder till att en stor mängd oförbrända brandgaser ansamlas i brandrummet. Branden i rummet kan även till synes självslockna. Om temperaturen fortfarande är hög i rummet kan mycket oförbrända gaser ansamlas i brandgaslagret.

Den bränslerika atmosfären blandas så småningom med luft och syrehalten stiger, vilket leder till att en förblandad gasmassa skapas.

En brandgasexplosion kan alstra mycket höga tryck. Tryckökningen i rummet styrs av följande:

- ventilationsöppningens/öppningarnas storlek
- andelen förblandad volym
- byggnadsdelarnas trycktålighet
- förbränningshastigheten ( $S_u$ )
- expansionsfaktorn

Det bör tilläggas att det inte finns någon skarp gräns mellan en brandgasexplosion och backdraft när man jämför den tryckökning som uppstår. Backdraften förutsätter dock att någon ventilationsöppning förändras. Karakteristiskt för brandgasexplosion är att brandgaserna är förblandade.

### ***Backdraft och övertändning - några kännetecken***

De flesta olyckor sker i samband med underventilerade bränder. Detta hör ihop med att det är svårt att upptäcka en nära förestående backdraft-situation. Personalens säkerhet får inte under några omständigheter sättas på spel. Speciellt utsatta är rökdykarna eftersom de ofta arbetar i en farlig miljö. Rökdykarna har bl.a. till uppgift att söka efter människor i rökfyllda utrymmen. Det är viktigt att komma ihåg att förhållandena i en specifik situation kan ändras drastiskt på ett fåtal sekunder. Det är därför viktigt att rökdykarna och den personal som jobbar utanför byggnaden är välinformerade om de kännetecken som kan indikera en nära förestående övertändning eller backdraft. Ibland har personalen endast ett fåtal sekunder på sig att agera.

Ofta tas brandgasernas färg som ett kännetecken på en nära förestående backdraft eller övertändning. Brandgasernas färg är dock inget tillförlitligt kännetecken.

Eftersom brandgasernas densitet och färg är beroende av vilket material det är som brinner kan inte enbart dessa parametrar användas för att förutsäga en backdraft eller en övertändning. Då brandgaserna dessutom ibland kommer att studeras på natten i olika typer av gatljus eller andra ljuskällor är det svårt att få en bra uppfattning om risken. Kunskap behövs också om brandrummets innehåll.

*Kännetecknen måste bedömas utifrån den specifika situationen och tonvikten skall inte läggas på endast ett kännetecken, t.ex. brandgasernas färg. Om man däremot väger samman ett antal kännetecken kan man få en bra uppfattning om en backdraft eller övertändning är nära förestående.*

*Speciella kännetecken på en nära förestående backdraft kan vara följande:*

Brandmannen bör observera följande innan han öppnar dörren till rummet:

- bränder i slutna utrymmen där ventilationen är minimal, t.ex. slutna rum eller undertaks-utrymmen. Här skapas förutsättningarna för backdraft.
- oljiga avlagringar på fönsterglas som är ett tecken på att pyrolysisprodukter kondenserat på kalla ytor.
- varma dörrar och fönster som indikerar att branden har pågått ett tag, kanske med begränsad ventilation.
- pulserande brandgaser från små öppningar i rummet.
- visslande ljud i öppningar som kan relateras till brandens pulsation.

Brandmannen kan observera följande efter det att han gått in i brandrummet eller tittar in i rummet:

- Blå flammor som indikerar förbränning av kolmonoxid. Kolmonoxid har skapats p.g.a. en ofullständig förbränning. Ju mindre ventilationen är desto mer kolmonoxid bildas.
- En orange glöd eller en icke synlig brand kännetecknar att branden pågått en längre tid med syrebrist.
- Brandgas dras tillbaka genom öppningen och kännetecknar att ”gravity current” är på gång.

*Kännetecken på en nära förestående övertändning:*

- Det sker en kraftig ökning av temperaturen i rummet; det ser ut som om branden *skjuter fart*. När temperaturen ökar kommer även tryckskillnaden i rummet att öka och därmed också brandgasernas hastighet ut genom öppningen.
- Flammor börjar synas uppe i brandgaslagret.
- Alla ytor avger pyrolysgaser, vilket beror på att strålningsnivån i rummet ökar drastiskt.
- Flammor börjar sprida sig upp längs med taket.

*Kännetecknen på brandgasexplosion:*

Tyvärr är det mycket svårt att förutsäga en brandgasexplosion och det är ofta därför som denna får allvarliga konsekvenser. Man kan dock observera ansamlingar av brandgaser i angränsande utrymmen, speciellt i samband med underventilerade bränder.

## 12 LITTERATURÖVERSIKT

### *Inledning*

Syftet med detta kapitel är att ge en summarisk översikt av en del artiklar, rapporter och tidningsurklipp som har publicerats internationellt om fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion. Materialet delas upp i följande kategorier:

- tidigare litteraturundersökningar
- skrifter som teoretiskt beskriver fenomenet övertändning
- skrifter som mer praktiskt beskriver fenomenet övertändning
- skrifter som behandlar fenomenet backdraft

Denna litteraturundersökning behandlar endast 20 av de viktigaste och senaste skrifterna, eftersom de tidigare litteraturundersökningarna var mycket grundliga; den intresserade läsaren hänvisas till referenser /12.1/ och /12.2/.

### *12.1 Tidigare litteraturundersökningar*

Chitty /12.1/ vid Fire Research Station i England publicerade 1994 en omfattande litteraturundersökning och beskrivning av fenomenet backdraft, där han refererar till över 90 skrifter om ämnet. Samtidigt diskuteras övertändning, eftersom detta är ett fenomen nära besläktat med backdraft och ofta inträffar innan eller efter övertändning. Chitty /12.1/ refererar även till kontakter och samtal med diverse internationella forsknings- och räddningsinstitut. Föreliggande rapport använder flitigt de resultat som Chitty /12.1/ har kommit fram till.

Croft /12.2/ publicerade en artikel i Fire Safety Journal 1980 som beskriver en litteraturundersökning inom ämnet brandgasexplosioner. Undersökningen hänvisar till 127 bränder vid vilka räddningstjänstpersonal konfronterades med brandgasexplosioner. Den exakta definitionen av brandgasexplosion i denna skrift är svårtolkad. Det är dock viktigt att betona att i vissa situationer kan det vara svårt att skilja fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion.

### *12.2 Teoretisk beskrivning av fenomenet övertändning*

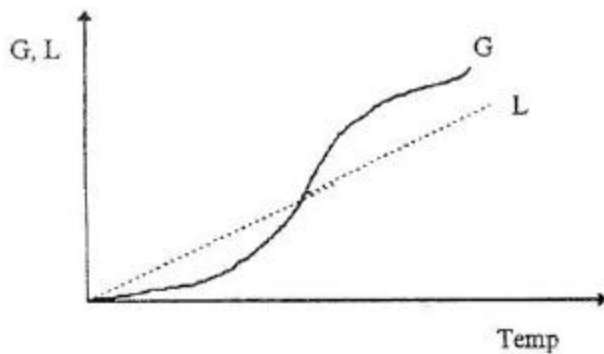
Den teoretiska beskrivningen av fenomenet övertändning består mestadels av att energibalansen i ett brandrum beaktas. Energibalansen kan sägas vara ökningen av gasernas temperatur i rummet är lika med differensen mellan utvecklad värme och värme som förloras genom omslutande konstruktioner och förloras ut genom öppningen med varma gaser. Detta skrivs ofta som

$$L(T) = G(T)$$

där  $L(T)$  representerar förlusterna och  $G(T)$  ökningen. Drysdale /12.3/ har nyligen publicerat en allmän beskrivning av fenomenet övertändning, där de mest fundamentala fysikaliska sambanden ges. En sådan beskrivning ges i kapitel 5 och är på lagom nivå för förståelse av de grundläggande koncepten.

En något mer ingående analys gavs av Thomas /12.4/ och av Thomas et al /12.5/, där övertändningsfenomenet beskrivs som en termisk instabilitet. Detta sätt att beskriva fenomenet har sedan dess vidareutvecklats av bl. a. Bishop et al /12.6/, Holborn et al /12.7/, Beard et al /12.8/, Beard et al /12.9/ och Graham et al /12.10/.

Dessa modeller är framtagna för att identifiera kritiska förhållanden för övertändning och resultaten visas enklast i form av diagram som det i figur 12.1.



Figur 12.1 Kritiska förhållanden för övertändning

Diagrammet i figuren kallas ofta för "Seminov-diagram" och tar sitt namn från klassisk antändningsteori. Den beskriver de två kurvorna för  $G(T)$  (energiutvecklingen) och  $L(T)$  (förlusterna). Är förlusterna små kan detta leda till övertändning. Är däremot värmeförlusterna stora och värmeutvecklingen liten, ramlar systemet tillbaka och ingen instabilitet (övertändning) sker.

De ovannämnda referenserna /12.4/ - /12.10/ beskriver och utvecklar i detalj termerna i de två variablerna  $G(T)$  och  $L(T)$  samt diskuterar ett antal omständigheter där dessa är lika och en kritisk händelse äger rum.

### ***12.3 Mer praktisk beskrivning av fenomenet övertändning***

Ett stort antal skrifter finns som innehåller beskrivningar av vissa, ofta kända, bränder som resulterade i katastrofala övertändningar. Här kan bl.a. nämnas Rasbash /12.11/. Han beskriver brandutvecklingen och de främsta orsakerna till att övertändning har skett. Ett antal exempel på praktiska fall har beskrivits i kapitel 5, 6 och 7. Ett antal fiktiva scenarier beskrivs också i kapitel 9 i denna rapport.

Giselson och Rosander /12.12/ har beskrivit övertändningar på ett praktiskt sätt. Ett flertal skrifter finns framtagna av SRV där deras beskrivningar används som utbildningsmaterial för brandpersonal. Materialet är av stor nytta praktiskt sett, men begreppen och förklaringar till vissa fenomen är inte harmoniserade med den internationellt använda terminologin. Framför allt saknas resonemang om olika typer av flammor.

### ***12.4 Beskrivning av fenomenet backdraft***

Fleischman /12.13/-/12.15/ utförde en serie experiment där fenomenet backdraft studerades. Denna serie utgör den enda seriösa experimentella studien av fenomenet som finns. Bränslet bestod av naturgas och propangas från en brännare i ett litet, stängt rum. Försöken utfördes i halvskala, ca  $1.2 \times 2.4 \times 1.2 \text{ m}^3$ . Branden blev snart underventilerad och slocknade. Metangasen fortsatte dock att strömma in i rummet tills en viss koncentration uppnåts.

Därefter öppnades en lucka som medförde att luft kom in, som genom tyngdkraftsstyrd strömning (gravity current) delvis blandades med oförbrända gaser. Öppningsstorleken varierade. En manuellt styrd gnista antände blandningen, vilket resulterade i en backdraft. Ibland startades gnistbildarna när luftströmmen hade reflekterats mot bakväggen och ibland direkt när luckan öppnades. I några fall startades inte gnistbildarna förrän flera minuter efter det att luckan öppnats. På så sätt erhöles antändning av olika stora mängder förblandade gaser. Detta leder till olika snabba förlopp och olika stora tryckökningar. Olika brännareffekter och öppningstider studerades.

Studien gav resultatet att det behövs minst 15 vol % oförbrända gaser för att en backdraft skall skapas under dessa förhållanden. Det bör dock tilläggas att metangas inte till fullo speglar verkliga förhållanden.

Fleischmanns studie utfördes i halvskala och ett av frågetecknen var om resultaten skulle vara applicerbara på fullskala. Med bakgrund i detta byggdes en fullskalecontainer vid University of Canterbury, Christchurch, NZ. Containern hade måtten  $2.4 \times 6 \times 2.4 \text{ m}^3$ . Studien utfördes av Bollinger /12.16/ och bränslet var återigen metangas.

Totalt utfördes 21 försök och man gjorde mätningar för energiutveckling, koncentration av gaser, temperaturer och tryckprofiler. Luftströmmens utbredning studerades också med hjälp av videoanalys.

Endast två variabler studerades; flödehastigheten och tiden. Resultaten visar att det går att återskapa backdraft i fullskala och koncentrationerna som behövs är ungefär 15-20 vol% oförbrända gaser. Det konstaterades också att vinden har en mycket avgörande betydelse.

I samma container utfördes också ett antal försök där bränslet utgjordes av träribbstaplar. Bränslet placerades på en våg, och rummet hade enbart ytterst små öppningar. Bränslet var alltså placerat i golvnivå och syftet var att studera hur en begränsad ventilation påverkar rumsbranden. Sammanlagt utfördes sju försök, men inget av dem resulterade i en backdraft; detta beror troligen på att det är svårt att erhålla de höga bränslekoncentrationer som behövs för att en backdraft skall kunna uppstå.

Under ett av försöken inträffade en brandgasexplosion, men det går inte att dra några skarpa slutsatser av detta innan mer forskning inom området har utförts. Försöksserien utfördes av Millar /12.17/.

Amerikanen Gottuk /12.18/ har utfört ett antal backdraft försök. Bakgrunden till detta projekt var att det inträffat ett antal svåra olyckor på amerikanska fartyg. Dessa inträffade i maskinrum där flyktiga ämnen, framför allt diesel, läckt ut. Gottuk utförde ett antal fullskaleförsök både i container och på fartyg. Utredningen visade god överensstämmelse med Fleischmanns resultat. Försöken var mycket riskfyllda och stora säkerhetsåtgärder var nödvändiga. Gottuk utförde också ett mycket stort antal släckförsök för att studera vattnets inverkan på brandförloppet.

I Japan har ett antal backdraft experiment utförts vid universitetet i Sapporo och har resulterat i två artiklar, /12.19/ och /12.20/. En första försöksserie utfördes i ett litet rum med måtten 0.85\*0.78\*1.08 och med varierande öppningar och bränslegeometrier. Totalt utfördes 17 experiment för att studera ventilationens inverkan på dessa situationer. Experimenten ledde fram till att en viss öppningsfaktor verkade vara lämplig för att kunna skapa backdraft-situationer.

I den efterföljande försöksserien utfördes försök med samma öppningsfaktor hela tiden. Under försöken mättes förbränningshastigheten genom att det brännbara materialet var placerat på en specialkonstruerad våg. Bränslet var placerat på väggar och tak och initialbranden bestod av träribbstaplar. Försöken spelades in med hjälp av video; detta var möjligt då en av långväggarna bestod av glas. Man lyckades återskapa backdraft-situationer flera gånger.

Frågan är dock om detta fenomen kan kallas backdraft eller inte. Enligt de flesta definitioner är backdraft en händelse som inträffar då en ventilationsöppning ändras. Så var dock inte fallet här och det är därför möjligt att fenomenet istället skulle kallas för brandgasexplosion.

## 12.5 Referenser

- /12.1/ Chitty, R., A Survey of Backdraught, Fire Research and Development Group, Home Office 1994
- /12.2/ Croft, W.M., "Fires Involving Explosions - A Literature Review", Fire Safety Journal, Vol. 3, 1980
- /12.3/ Drysdale, D.D., "The Flashover Phenomenon", Fire Engineers Journal, nov 1996
- /12.4/ Thomas, P.H., "Fires and Flashover in Rooms - a Simplified Theory", Fire Safety Journal, Vol 3, 1980
- /12.5/ Thomas, P.H., Bullen, M.L., Quintiere, J.G., McCaffrey, B.J., "Flashover and Instabilities in Fire Behaviour", Combustion and Flame, Vol. 38, 1980
- /12.6/ Bishop, S.R., Holborn, P.G., Beard, A.N., Drysdale, D.D., "Nonlinear Dynamics of Flashover in Compartment Fires", Fire Safety Journal, Vol. 21, 1993
- /12.7/ Holborn, P.G., Bishop, S.R., Drysdale, D.D., Beard, A.N., "Experimental and Theoretical Models of Flashover" Fire Safety Journal, Vol. 21, 1993
- /12.8/ Beard, A.N., Drysdale, D.D., Holborn, P.G., Bishop, S.R., "Non-linear Model of Flashover", Fire Science and Technology, Vol. 12, 1992
- /12.9/ 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
- /12.10/ Graham, T.L., Makhviladze, G.M., Roberts, J.P., "On the Theory of Flashover Development", Fire Safety Journal, Vol. 25, No. 3, 1995
- /12.11/ Rasbash, D.J., "Major Fire Disasters Involving Flashover", Fire Safety Journal, Vol. 17, No. 2, 1991
- /12.12/ Giselson, K, Rosander, M., Brandkunskap, Giro-Brand, 1993
- /12.13/ Fleischman, C.M., Pagni, P.J., Williamsson, R.B., "Exploratory Backdraft Experiments", Fire Technology, Vol. 29, No. 4, 1993
- /12.14/ Fleischmann, C., Pagni, P.J., Williamson, R.B., "Quantitative Backdraft experiments", Proceedings of 4<sup>th</sup> International symposium on Fire Safety Science (IAFSS) 1994
- /12.15/ Fleischmann, C., Backdraft phenomena, NIST-GCR-94-646, University of California 1994
- /12.16/ Bolliger, I., "Full residential- Scale experiments", Fire Engineering



Research report, University of Canterbury 1995

/12.17/ Millar, D.J., "Full Scale Limited Ventilation Fire Experiments", Fire Engineering Research report, University of Canterbury 1995

/12.18/ Gottuk, D.T., Peatross, M.J., 1995 Class B Firefighting Doctrine and Tactics: Final Report, Naval Research Laboratory, Washington DC 1996

/12.19/ Hayasaka, H., Kudou. Y., Backdraft experiments in a small compartment, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997

/12.20/ Hayasaka, H., Kudou. Y., Burning rate in a small compartment fire, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997

## 13 FORSKNINGS- OCH UTBILDNINGSBEHOV

### *Inledning*

Syftet med detta kapitel är att diskutera inom vilka områden forskning är nödvändig inom en snar framtid. Kapitlet sammanfattar också vad som kan göras på utbildningssidan, framför allt på räddningsskolorna, för att förbättra den redan internationellt erkända utbildningen. Detta utgör inte något fullständigt förslag; den uppgiften ligger på utbildningsavdelningen på Räddningsverket, och ingår som den tredje delen i projektet.

### *Innehållsförteckning*

13.1 Framtida forskningsbehov .....	13-2
13.2 Framtida utbildningsbehov .....	13-3

### 13.1 Framtida forskningsbehov

De frågor som främst bör besvaras i en närliggande framtid är:

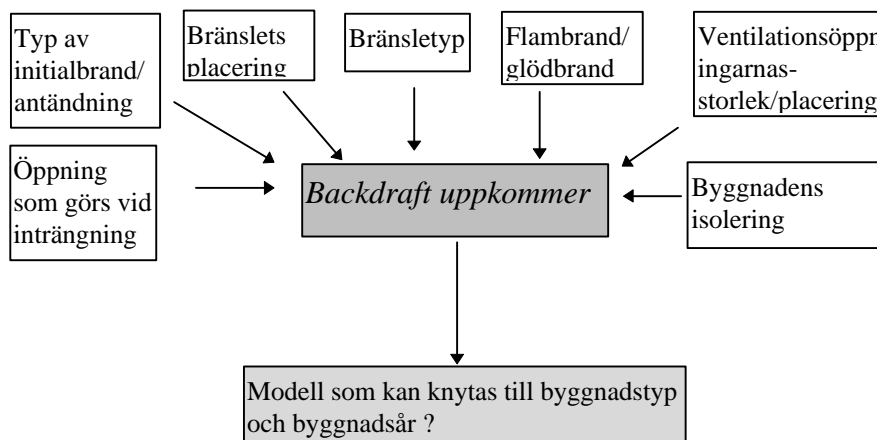
- Vilka parametrar styr uppkomsten av en backdraft?
- Hur skall man skydda sig mot en backdraft?
- Vad händer när en backdraft sprider sig ut i andra rum?

#### Vilka parametrar styr uppkomsten av en backdraft?

I de flesta försök som utförts har bränslet varit gasformigt. Med hjälp av gasformigt bränsle kan koncentrationen av oförbrända gaser i rummet enkelt kontrolleras. Det är lätt att erhålla de höga koncentrationer som normalt krävs för att en backdraft skall uppstå.

I framtiden är det viktigt att studera vilka parametrar som gör att höga bränslekonzentrationer kan uppnås i brandrummet. Det är viktigt att man mäter koncentrationerna av oförbrända gaser noga för att kunna dra viktiga slutsatser. Bränslet bör vara vanliga material som exempelvis trä och plast. Det är viktigt att man utför försök i olika geometrier, att bränslet placeras på olika ställen i rummet och att man varierar öppningsfaktorn.

Bilden nedan beskriver de parametrar som inverkar på uppkomsten av backdraft.



*Bränslets placering* påverkar produktionen av oförbrända gaser exempelvis utvecklar takmaterial av trä mycket höga halter CO, i vissa situationer upp till 10-15 vol%.

*Byggnadens isolering* inverkar genom att temperaturen i rummet blir olika hög. Detta kan bidra till att olika mängder oförbrända gaser bildas. Om byggnaden är välisolerad kommer temperaturen att vara högre än om byggnaden är dåligt isolerad.

*Ventilationsöppningarnas storlek* påverkar mängden luft som kommer in i rummet. Om öppningarna är för stora växer branden eventuellt till övertändning, om de är

för små kanske branden självslocknar. Glödbränder kan dock fortfarande skapa bränslerika atmosfärer.

*Ventilationsöppningarnas placering* påverkar också branden. Om öppningarna sitter högt upp kommer en stor del oförbrända gaser att läcka ut. I Fleischmanns försök var det svårt att erhålla backdraft med öppningarna placerade högt upp i rummet.

*Öppningen som görs vid inträngning* påverkar hur mixningen av luft och brandgaser kommer att ske i rummet. Den styr hur stor den förblandade regionen blir och hur kraftig expansionen blir om gaserna antänds.

*Flambrand/glödbrand* påverkar hur mycket oförbrända gaser som kan bildas i rummet.

Om man kan konstatera vilka parametrar som är avgörande för uppkomsten av backdraft finns det möjlighet att uppskatta sannolikheten för att backdraft skall uppstå i en viss typ av byggnad. För att studera hur olika parametrar påverkar möjligheten att skapa en backdraft bör avancerade datorprogram, s.k. fältmodeller, användas för att modellera olika parametrar. Det är nämligen mycket kostsamt att utföra experiment, framför allt i större skala. Problemet med fältmodellerna är att framför allt flamspridningsmodeller, pyrolysmoeller och förbränningsmodeller måste förbättras för att kunna modellera en backdraft-situation.

#### **Hur skall man skydda sig mot en backdraft ?**

- Skall man stänga dörren efter sig när man har gått in i rummet?
- Kan vertikal eller horisontell ventilation förhindra backdraft ?
- Hur skall vatten påföras för att ge ett bra skydd?

#### **Vad händer när en backdraft sprider sig ut i andra rum?**

Ibland inträffar en backdraft i utrymmen som inte angränsar till det fria. Ett exempel kan vara om en lägenhet angränsar till ett trapphus. Om antändning av brandgaserna sker när brandpersonal öppnar dörren till lägenheten kan hela trapphuset fyllas av flammor och konsekvenserna bli mycket allvarliga. Tryckökningarna kan bli mycket kraftiga.

### ***13.2 Framtida utbildningsbehov***

Framför allt inom följande område kan utbildningen kompletteras för att ge en klarare bild av de olika fenomenen som inträffar:

- Olika typer av flammor
- Visualisera luftströmmens väg in i rummet när en öppning görs
- Vad händer om en större del av gaserna förblandas före antändning sker efter det att en öppning gjorts?

### **Olika typer av flammor**

I Sverige har vi sedan länge använt teorier om förblandade gaser för att beskriva olika fenomen i brandförloppet. Föreliggande rapport visar på skillnader i olika typer av flammor under brandförloppet. Man skiljer på:

- Förblandade flammor
- Diffusionsflammor

I en förblandad flamma är bränslet och luften förblandade innan antändning sker; i en diffusionsflamma är bränslet och luften separerade före antändning. Den största skillnaden är att en diffusionsflamma har en mycket lägre förbränningshastighet än en förblandad flamma. Under den normala övertändningsperioden är flammorna oftast diffusionsflammor.

På räddningsskolorna används i dag "akvariet" för att förevisa olika typer av händelser i brandförloppet. Ofta får propangasen möjlighet att blandas mycket väl med luften innan antändning sker. Detta leder till att det uppstår en kraftig deflagration vid antändningen. Förbränningshastigheten är mycket hög. Akvariet bör kompletteras med förevisningar av diffusionsflammor för att ge en rättvis bild av vad som inträffar under en verklig rumsbrand. Om inte akvariet används, kan andra enkla övningar utföras för att visa diffusionsflammor.

### **Visualisera luftströmmens väg in i rummet när en öppning görs**

Fleischmann utförde ett antal saltvattenförsök under sitt avhandlingsarbete. Försöken utfördes i liten skala med olika öppningsfaktorer. Man skapade olika densitet hos vätskorna genom att tillsätta olika mängder salt. En pH-indikator användes för att visualisera den region där de båda vätskorna blandats. Det spelar ingen roll att försöken utfördes med vätskor; principen är densamma för luftblandningar. Resultaten applicerades sedan på försök utförda i ett rum av storleken  $1.2 \times 1.2 \times 2.4 \text{ m}^3$ . Dessa visade god överensstämmelse.

Dessa försök kan enkelt utföras för att beskriva hur luftströmmen blandas med de bränslerika gaserna. Praktiskt sett är det inga problem och det är inte förknippat med några större ekonomiska kostnader.

### **Vad händer om en större del av gaserna förblandas före antändning efter det att en öppning görs?**

I Nya Zeeland förevisas fenomenet backdraft med hjälp av en specialbyggd container. Backdraft-containern är utformad med ett glas på ena långsidan för att kunna studera vad som inträffar i rummet. Vidare är den utformad med en tryckavlastningslucka för att förhindra att trycket stiger över det tillåtna i utrymmet. På framsidan av containern finns en lucka som släpper in luften i containern och inne i containern finns en brännare som tillför bränsle.

Försöken ger en uppfattning om konsekvenserna av en backdraft. I de flesta verkliga fall sker inte backraften speciellt häftigt och eldklotet utanför öppningen

blir litet. Detta beror oftast på att den bränslekonzentration som behövs för att erhålla en backdraft är svår att uppnå vid en normal rumsbrand.

Problemet är att när det väl inträffar en kraftig backdraft blir konsekvenserna ofta allvarliga p.g.a. av att kunskapen är otillräcklig. Det är därför av största vikt att demonstrera fenomenet för att upplysa om vad som kan inträffa i sällsynta fall.

Om en backdraft inträffar vid inträngning i en lägenhet som har anknytning till ett trapphus kan de expanderande gaserna i sällsynta fall fylla upp hela trapphuset.

En backdraft-container finns beskriven i detalj i appendix A, inklusive en detaljerad kostnadsplan. Det är viktigt att påpeka att utförandet av experiment är förknippat med strikta säkerhetsbestämmelser som måste respekteras.

# Appendix

Appendix A: Backdraft-container

Appendix B: Experimentella data

Appendix C: Omvandling av mätdata

Appendix D: Beräkningsmetod för antändning av brandgaslagret - Beylers metod

Appendix E: Beräkningsmetod - Flashover A1

Appendix F: Beräkningsmetod - CFAST

Appendix G: Beräkningsmetod - SOFIE

Appendix H: Beräkningsmetod - MQH-metoden

Appendix I: Småskaleförsök som enbart videofilmades

## Kort sammanfattning av innehållet i appendix:

I **appendix A** beskrivs hur man skall kunna uppföra en s.k. backdraft-container. De olika byggnadskomponenterna specificeras och en kostnadsplan tas fram. Ett översiktligt förslag till utbildningsmaterial ges.

I **appendix B** beskrivs två försöksserier som har utförts i tredjedelsskala. Den ena försöksserien utfördes med metan som bränsle och den andra med heptan och trä. Data från försöksserierna har använts till att verifiera de modeller som beskrivs i appendix D- H.

I **appendix C** beskrivs hur mätdata har använts och omräknats till t.ex. effektutveckling, massflöde och genomsnittstemperatur.

I **appendix D** beskrivs Beylers model som är en model som uppskattar om ett brandgaslager kommer att börja brinna eller inte. Modellen jämförs därefter med mätdata från tredjedelsförsöken beskrivna i appendix B.

I **appendix E** beskrivs datormodellen Flashover A1. Modellen är utvecklad vid universitetet i Edinburgh. Modellen uppskattar risken för att en övertändning skall uppstå i ett rum och modellen kan ta hänsyn till flamspridning och återstrålning till bränsleytan. Modellen jämförs med mätdata från appendix B.

I **appendix F** beskrivs datormodellen CFAST. CFAST är en s.k. tvåzonsmodell och används internationellt vid dimensionering. Modellen kan uppskatta sannolikheten för

övertändning genom att studera temperaturen i brandgaslagret. En viss temperatur ger upphov till strålning som antänder allt brännbart i brandrummet. Modellen jämförs med mätdata från appendix B.

I **appendix G** beskrivs datormodellen SOFIE. SOFIE är en s.k. fältmodell som delar upp rummet i ett antal kontrollvolymmer och löser bl.a. mass- och energibalansen för varje kontrollvolym. Modellen kan uppskatta risken för övertändning genom att man studerar temperaturen och koncentrationen av bränsle och syre i rummet. Modellen jämförs med mätdata från appendix B.

I **appendix H** beskrivs handräkningsmodellen MQH-metoden. Denna är empirisk och bygger på ett stort antal fullskaleförsök. Ett regressionsuttryck har därefter anpassats till mätdata. Metoden kan uppskatta risken för övertändning genom att temperaturen beräknas i brandrummet och jämförs med de kriterier som finns för övertändning. Modellen jämförs med mätdata från appendix B.

I **appendix I** beskrivs ett fåtal tredjedelsförsök som utfördes i laboratoriet vid institutionen för brandteknik. Endast videoupptagning skedde. Syftet var att studera ytskiktens inverkan på brandförloppet samt att studera hur ett brandgaslager antänds.

Det bör observeras att modellerna endast kontrolleras mot ett antal småskaleförsök. Inga fullskaleförsök har utförts för att ge mätdata som verifierar modellerna.

Observera att stora delar av textmassan i appendix B- F har skrivits av projektarbetarna Anders Edstam och Peter Söderström. Detta material publicerades ursprungligen i rapporten "Beräkningsmodeller för övertändning och förbränningsprodukter - En utvärdering" som gavs ut vid institutionen för brandteknik i maj 1998. Lasse Bengtsson var handledare för projektet.

Simuleringarna som beskrivs i appendix G har utförts i samarbete med projektarbetaren Jörgen Carlsson.



## Appendix A: Backdraft-container

### *Innehållsförteckning*

A.1 Inledning	A2
A.2 Syfte och mål	A2
A.3 Konstruktion av en backdraft-container	A2
A.3.1 Fönster på långsidan	A3
A.3.2 Tryckavlastningsyta på containerns baksida	A5
A.3.3 Öppning på containerns framsida	A7
A.3.4 Små läckageytor	A8
A.3.5 Eventuella ytskikt i containern	A8
A.3.6 Bränsle och antändningskälla	A8
A.4 Installering, provkörningar och finjusteringar	A9
A.5 Kostnadsplan	A9
A.6 Förslag till utbildningsmaterial	A9
A.7 Slutsatser	A10
A.8 Referenser	A10

## **A.1 Inledning**

När fenomenet backdraft inträffar vid brand kan detta leda till att mycket kraftiga flammor sticker ut genom byggnationens öppningar. Detta kan alstra kraftiga tryckvågor. Även en mindre kraftig backdraft kan leda till övertändning eller till relativt långvarig förbränning (och därmed flammor) utanför en öppning. Fenomenet har orsakat dödsfall och kan på kort tid orsaka mycket snabb brandtillväxt till övertändning. Det är därför av stor vikt att räddningstjänstpersonal informeras om och utbildas i detta fenomen.

I rapporten "Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion" (Räddningsverket, Karlstad, 1997) [A.1] diskuteras de fysikaliska och kemiska processer som leder till backdraft. Termerna "varm, fet övertändning" och "fördröjd övertändning" har tidigare använts i detta sammanhang. Definitionen på fenomenet backdraft återges nedan:

*"Begränsad ventilation kan leda till att en brand producerar brandgaser som innehåller stora mängder oförbrända gaser. Om dessa samlas, kan tillförseln av luft till lägenheten när en öppning görs leda till en deflagration som sprider sig genom rummet och ut genom öppningen. Denna deflagration kallas backdraft".*

En mer fullständig beskrivning av de fysikaliska och kemiska processerna ges summariskt i referens [A.1].

Internationellt pågår arbete med backdraft-containerar i full skala och mindre skala, bl.a. i Nya Zeeland, Japan och USA. I England pågår arbete vid Home Office med tredjedelsskale- utrustning. De mest intressanta arbetena vad gäller utbildning och träning av brandmän utförs i Nya Zeeland och i Japan. Detta arbete beskrivs bl.a. i rapporterna [A.2] och [A.3] (Nya Zeeland) och [A.6] (Japan). I forskningssyfte har även arbete utförts vid University of California [A.7] och vid Hughes Associates i Baltimore [A.8].

## **A.2 Syfte och mål**

Syftet är att grovt specificera hur en backdraft container kan konstrueras och ge en grov kostnadsuppskattning för byggandet. Det långsiktiga målet är att ta fram en sådan container med tillhörande utbildningsmaterial som kan användas i utbildningssyfte för räddningstjänsten.

## **A.3 Konstruktion av en backdraft-container**

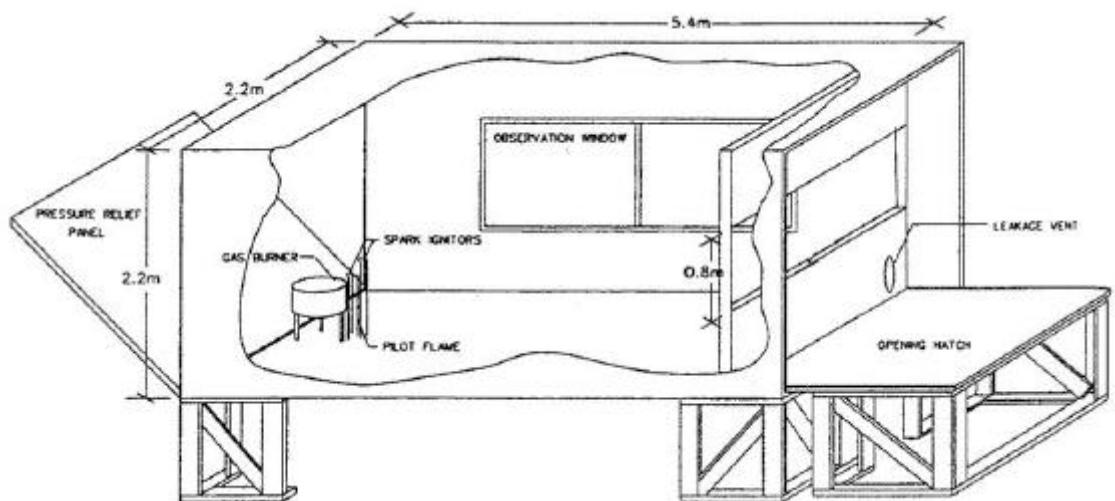
Backdraft-containern kommer att bestå av en standardcontainer, isolerad och med trägol, med måtten 2.4 m, 6 m och 2.4 m. Följande modifikationer kommer att utföras:

1. Ett stort fönster sätts in på den ena långsidan.

2. En tryckavlastningsyta skapas på containerns baksida; luckan öppnas om trycket överstiger ett visst värde.
3. En öppningslucka konstrueras på containerns framsida för luftinsläpp, vilket resulterar i backdraft.
4. Två små läckageytor, nära taket och nära golvet, anordnas för att man skall kunna kontrollera ventilationsförhållandena och för att hindra tryckuppbyggnad i initialstadiet.
5. En gasbrännare och antändningskälla installeras i containern.

Vidare är det lämpligt att containergolvet ligger på ca 0.8 m höjd från marken så att man kan åskådliggöra experimenten; ett ställage konstrueras under containern. Det kan också vara lämpligt att klä containerns väggar och tak med gipsskiva för att förhindra läckageareor. Det är viktigt att containern är tät för att kunna orsaka kontrollerad backdraft. Containerns täthet måste undersökas och eventuella ytmaterial diskuteras senare.

Figur A.1 visar containern efter att dessa ändringar har gjorts. Figuren visar fönstret, tryckavlastningsluckan på baksidan och öppningsluckan på framsidan.



Figur A.1, Skiss av containern med modifikationer.

### A.3.1 Fönster på långsidan

För att kunna observera backdraft förloppet visuellt måste ett fönster installeras på containerns ena långvägg. Fönstret måste tåla höga temperaturer under mycket korta perioder (mindre än en minut) och kunna motstå höga tryck. I Nya Zeeland [A.2], [A.3] användes för detta ändamål PYRAN® brandsäkert broscoliteglas, tillverkat i Tyskland. PYRAN® har testats och visar brandmotstånd upp till 2 timmar. Hela systemet med glass, ram, tätning och infästning måste vara identiskt med det som har testats.

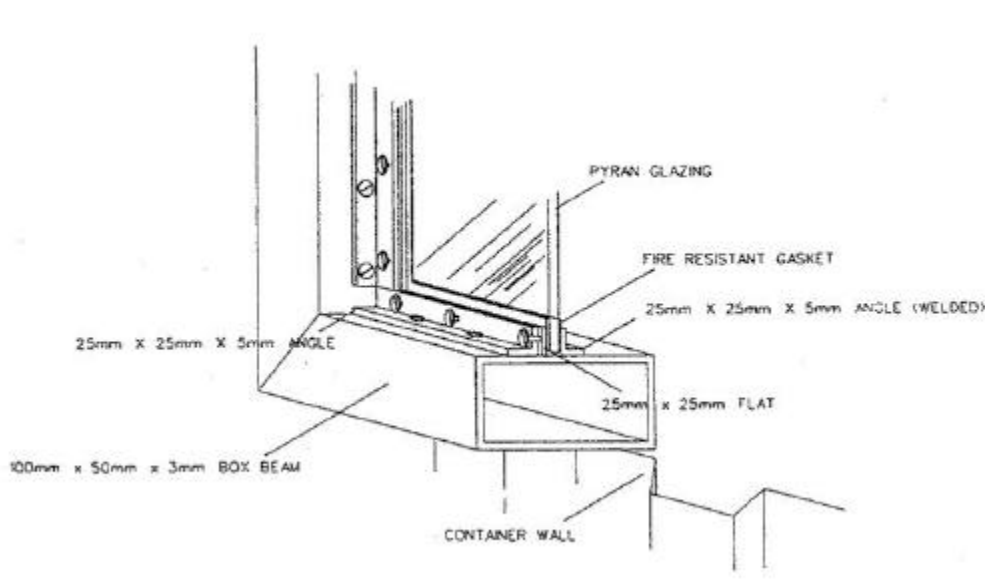
Fönsterglas går oftast sönder vid brand antingen på grund av termiska gradienter som orsakar spänning i glaset eller på grund av det tryck som alstras vid brand i ett stängt utrymme.

När fönstrets mittsektion värms upp och expanderar uppstår motstånd vid randen, där fönstret är kallare på grund av att fönsterkarmen skyddar och kyler. Den spänning som uppstår är den främsta orsaken till att fönstret går sönder. PYRAN® fönsterglas har utsatts för förspänning och kan därför motstå relativt höga spänningar.

Ett annan orsak till att spänningar uppstår är den termiska gradient som uppstår mellan ytan som är utsatt för värmen och ytan som är utanför containern. I normalfallet orsakar detta expansion av den ena ytan och resulterar i att glaset böjs inåt. PYRAN® fönsterglas har lågt expansionstal och denna effekt minimeras därför.

De tryck som PYRAN® kan motstå har uppmätts genom experiment i liten skala [A.2], [A.3]. Analysen gav resultatet att ett fönster som är 6.5 mm tjockt, 1584 mm långt och 1063 mm högt kunde motstå ett tryck på 7.4 kPa. Det är därför detta tryck används när tryckavlastningsluckan skall dimensioneras.

Figur A.2 visar hur ramen är konstruerad och hur glaset monteras i denna med tätningsmedel. Ramen är gjord av en 100 mm \* 50 mm \* 3 mm fyrkantig stålprofil (se figur A.2).



Figur A.2, Fönsterramens konstruktion.

### A.3.2 Tryckavlastningsyta på containerns baksida

Antändning av oförbrända gaser i containern kommer att orsaka en deflagration och alstra högt tryck. Det är mycket svårt att kontrollera hur högt trycket kan bli och om ingen tryckavlastning finns kan tryckvågen krossa fönsterglasets eller orsaka skada på containerns väggar. Det är därför nödvändigt att dimensionera en tryckavlastning för att begränsa tryckuppbyggnaden till en acceptabel nivå. Tryckavlastningens dimensionering beror bl.a. på tryckuppbyggnadshastigheten, maximalt möjliga tryckuppbyggnad samt luckans vikt och storlek (se NFPA [A.4] och FMS [A.5]).

Genom utnyttjande av referenser [A.4] och [A.5] kan luckan dimensioneras. Det kritiska trycket bestäms av containerns svagaste konstruktion, d.v.s. fönsterglasets. Konservativt kan fönstret beräknas tåla 7.4 kPa, vilket enligt [A.4] och [A.5] kräver en ventilationsyta på 4.2 m<sup>2</sup>. Denna ventilationsyta placeras lämpligen på en av de mindre väggytorna.

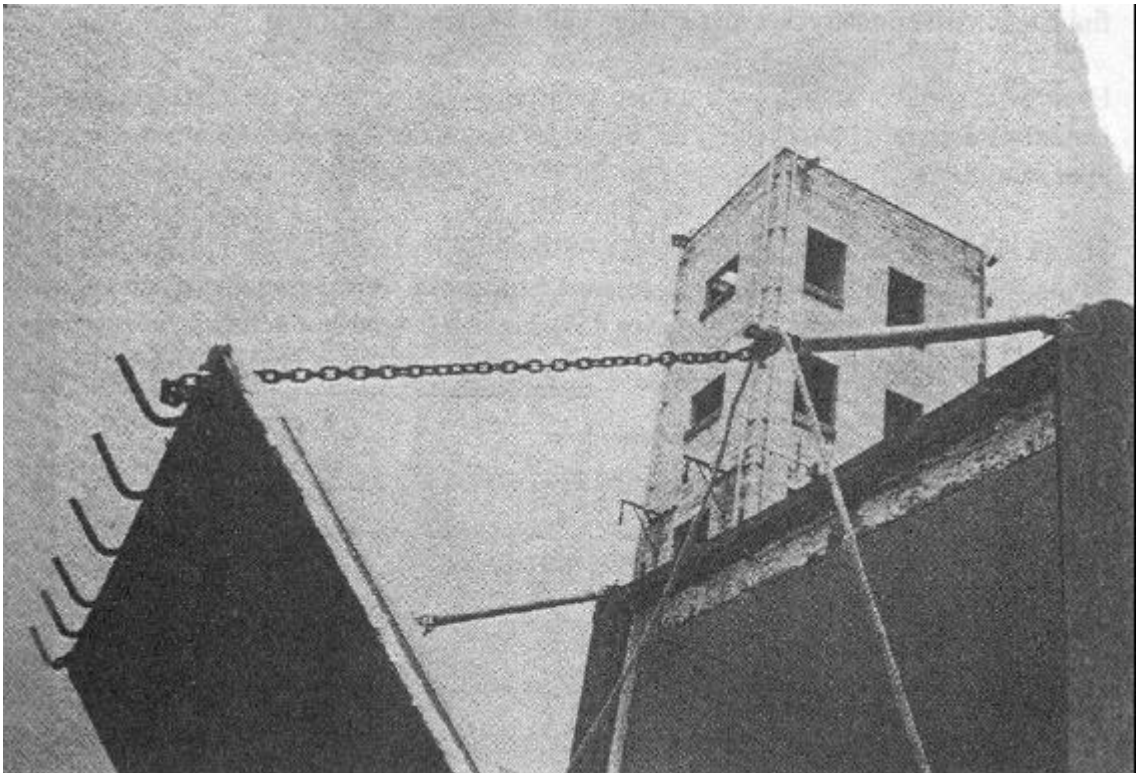
Detta innebär att hela bakre väggen måste agera som tryckavlastning, något som kan åstadkommas genom att man skär bort hela väggen. En L-profil svetsas på väggens övre del och nedre del. Identiska L-profiler svetsas på containerns tak och golv. Väggens nedre del fästs vid containerns golv med tre starka gångjärn. På väggens övre del länkas L-profilen med den L-profil som har svetsats på containerns tak. Dessa fästs ihop med plastband och det är styrkan i dessa som avgör aktiveringstrycket. För att finjustera aktiveringstrycket måste några enkla experiment utföras.

Eventuella sprickor som uppstår mellan avlastningsväggen och containern tätas med isoleringsmaterial. I [A.2] och [A.3] användes materialet Kaowool, motsvarande glasull eller stenull.

För att hindra att hela väggen faller från vertikalt till horisontellt läge vid aktivering, används kedjor och två kraftiga 0.3 m långa fjädrar som länkar containern och väggen och endast tillåter väggen att öppnas ca 45°. Figur A.3 visar hur detta kan konstrueras [A.2], [A.3]. Figur A.4 visar tryckavlastningsluckan i ett öppet läge [A.2], [A.3].



*Figur A.3, Tryckavlastningsluckan och dess länk vid containern.*



*Figur A.4, Tryckavlastningsluckan i öppet läge.*

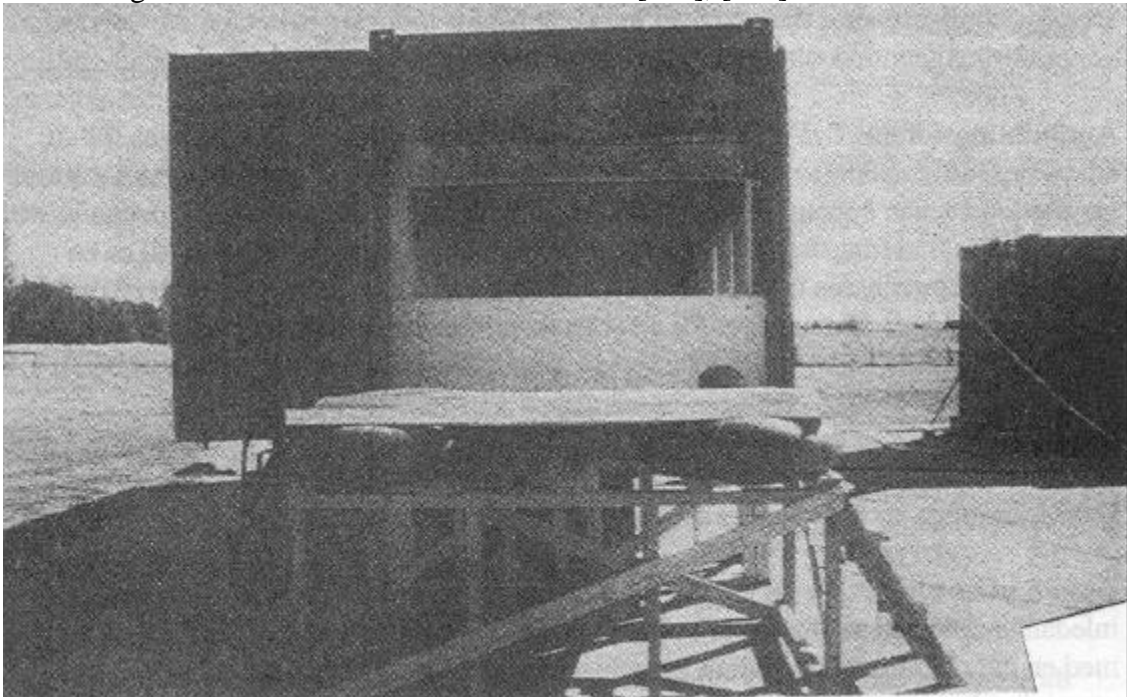
### A.3.3 Öppning på containerns framsida

För att simulera en backdraft krävs att branden är starkt underventilerad från början. Backdraft sker sedan efter en markant förändring av ventilationsförhållandena. För att tillåta en snabb förändring av ventilationsförhållandena installeras en speciell öppning på containerns framsida. Containerdörrarna tas inte av, utan används för att stänga och skydda containern; precis innanför dörrarna konstrueras dock en vägg med en öppning.

Öppningen i väggen är ca en tredjedel av containerns höjd och lika bred som containern. Öppningen är 750 mm hög och 2240 mm bred och öppningen konstrueras mitt i väggen, som syns i figur A.5 [A.2], [A.3]. Väggen består av två brandgipsskivor monterade på stålreglar som svetsas vid containerns insida.

Själva luckan är gjord av stålreglar klädda med en brandgipsskiva, eftersom luckan måste vara relativt lätt. Luckan är monterad på två ”armar” som är fästa med gångjärn på containerns undersida och kan därmed öppnas och falla ner till ett horisontellt läge. Luckans insida är täckt med stenull för att minimera läckage när luckan är i stängt läge; den har en öppningsanordning mitt på övre kanten och kan öppnas manuellt med ståltråd.

Två små fjädrar är monterade på luckans två översta hörn. Dessa två fjädrar medför att när öppningsanordningen aktiveras genom ståltråden, trycks öppningen ut en liten bit, till dess att tyngdkraften tar över och tillåter luckan falla ner till horisontellt läge. Uppblåsta gummislanger placeras på den plattform som luckan faller på för att hindra skada på luckan. Figur A.5 visar hur detta kan konstrueras [A.2], [A.3].



Figur A.5, Öppning på containerns framsida.

### A.3.4 Små läckageytor

Två små läckageytor anordnas nära golv och tak för att man skall kunna variera ventilationsförhållandena på ett kontrollerat sätt och hindra eventuell tryckupbyggnad innan backdraft tillåts inträffa. Exakt utformning av dessa anges i ett senare stadium.

### A.3.5 Eventuella ytskikt i containern

Standardcontainerns golv är av stålplåt. Det är därför lämpligt att klä golvet med brandgips eller annat obrännbart material. Ventilationsförhållandena måste vara väldefinierade för att backdraft skall kunna inträffa på ett kontrollerat sätt. Om containern inte kan antas vara tät, måste dess övriga insidor kläs med dubbla gipsskivor och tätas. Detta avgörs i ett senare stadium.

### A.3.6 Bränsle och antändningskälla

**Gasbrännare:** Många olika bränslen skall kunna användas i experimenten. Det mest vanliga bränslet är metangas som lagras i gastuber utanför containern. En högtrycksslang leder gasen till ett reglage där trycket minskar och sedan till en gasbrännare inuti containern. Gasbrännaren konstrueras på ett klassiskt sätt och består av en fyrkantig låda av stål, där toppen är öppen. Alla dimensioner är 0.56 m. Lådan är fylld med sand. Gasen kommer in i lådan genom rör på undersidan, stiger genom sanden och distribueras därmed över hela brännarens toppyta. Röret har en genomföring genom containerns golv. Detta ger en stabil diffusionsflamma.

**Antändningskälla:** Två transformatorer på 15000 volt kommer att användas för att antända pilotflamman (se nedan) och för att antända oförbrända gaser när ventilationsluckan öppnas. Två stycken 3 mm diaelektroder (gjorda av högledande ståltråd) förs från transformatorerna upp genom containerns golv och upp till ca en tredjedel av containerns höjd. När transformatorerna aktiveras uppstår en 5-10 mm lång gnista från tråden. Detta räcker för att antända pilotlågan och för att antända en gasblandning när backdraft skall initieras.

**Pilotlåga:** Eftersom det inte går att gå in i containern och manuellt tända gasbrännaren anordnas ett litet smalt rör som förs genom containergolvet upp till brännarens yta. Denna pilotlåga antänds av elektroder. Pilotlågan i sin tur antänder gasbrännaren.

**Annan utrustning:** För att kunna finjustera containern och försöken måste i ett inledande skede ett stort antal pilotförsök utföras. Containern måste på så sätt utrustas med en del mätutrustning så som termoelement, pitotrör, gasanalys o.s.v. Denna utrustning kommer att specificeras senare.



#### ***A.4 Installering, provkörningar och finjusteringar***

Det är endast under vissa förhållanden som backdraft inträffar. Faktorer som spelar in är:

- ventilationsytan på containerns framsida
- bränsletillförseln
- initialbrandens höjd
- antändningskällans styrka och placering
- hur ofta gnistbildning i antändningskällan sker
- antändningskällans varaktighet
- tiden fram till att containerns framsida öppnas

Ovan anges grova värden på en del av dessa variabler. Ett stort antal försök måste utföras för att finjustera dessa.

#### ***A.5 Kostnadsplan***

Denna kostnadsplan innehåller endast uppskattade kostnader för byggandet av själva containern. Installering av antändningskälla, gasbrännare, och eventuell instrumentering tas ej med här, inte heller de provkörningar som behövs för att finjustera utrustningen, ta fram säkerhetsrutiner och skapa förhållanden som tillåter backdraft att inträffa.

Inköp av en isolerad standardcontainer	15.000.-
Lön, två hantverkare i 4 veckor	40.000.-
Fönsterglas	20.000.-
Profiler, skruvar, tätningsmedel och annat material	20.000.-
Gasbrännare, gastuber, slangar, transformatorer, elektroder	30.000.-

Ett pilotprojekt där ett stort antal försök utförs måste sedan framtas för att finjustera utrustningen. En projektplan tas fram i ett senare skede.

#### ***A.6 Förslag till utbildningsmaterial***

Utbildningen antas bestå av föreläsningar och experiment. Vid föreläsningarna går man igenom en del av det material som presenteras i [A.1] och i denna rapport.

Huvudmomenten kan grovt antas bli:

- definitionen av fenomenet backdraft
- föreläsningar om de fysikaliska och kemiska processer som leder till att backdraft inträffar.

- visning av ”lådan” med diskussion om brännbarhetsgränser, förblandad förbränning och diffusionsflammar
- kännetecken på backdraft
- praktiska exempel där backdraft har inträffat (Case studies)
- videofilmer från olika försök
- visning av experiment i backdraft-containern
- diskussion

Detta är ett mycket grovt förslag till utbildningsmaterial. Ett slutligt förslag tas fram i samarbete med utbildningsenheten vid Statens Räddningsverk.

### ***A.7 Slutsatser***

Denna skrift har grovt skisserat hur en backdraft-container kan byggas och hur mycket en sådan kan tänkas kosta. För användning av en sådan container i utbildningssyfte måste först ett experimentellt pilotprojekt utföras för att finjustera utrustningen och ta fram förslag till utbildningsmaterial.

### ***A.8 Referenser***

- [A.1] Bengtsson, L-G., Karlsson, B., Fenomenen övertändning, backdraft och brandgasexplosion, Rapport no, P21-185/97, Räddningsverket, Karlstad 1997.
- [A.2] Bolliger, I.B., ”Full Residential-Scale Backdraft”, Fire Engineering Research Report 95/1, School of Engineering, University of Canterbury, New Zealand 1995.
- [A.3] Millar, D.J., ”Full Scale Limited Ventilation Fire Experiments”, Fire Engineering Research Report 95/4, School of Engineering, University of Canterbury, New Zealand 1995.
- [A.4] NFPA 68, Guide for Venting of Deflagrations, National Fire Protection Association 1988.
- [A.5] FMS, Loss Prevention Data, Damage Limiting Construction, 1-44, Factory Mutual System 1991.
- [A.6] Hayasaka, H., Kudou, Y., Kojima, H., Hashigami, T., Ito, J. Ueda, T., Backdraft Experiments in a Small Compartment, Hokkaido University, Japan 1997.
- [A.7] Fleischman, C.M., Pagni, P.J., Williamsson, R.B., ”Exploratory Backdraft Experiments”, Fire Technology, Vol. 29, No. 4, 1993
- [A.8] Gottuk, D.T., ”The Development and Mitigation of Backdrafts: A Full-Scale Experimental Study”, Proceedings of the 5th Symposium, International Association of Fire Safety Science, Ed. Hasemi, Y., Tsukuba, Japan 1997.

## Appendix B: Experimentella data

### *B.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 författaren själv i vilken heptan användes som bränsle. Den andra försöksserien är utförd av Anders Edstam och Peter Söderström, som i sina försök använde metan som bränsle. Försöksuppställningen till heptanförsöken är den samma som användes under de s.k. Toxireförsöken utförda vid LTH Brandteknik i Lund /B.1/. Metanseriens försöksuppställning är inte riktigt identisk med dessa försök; det användes en annan förbränningskammare och de mätningar som utfördes vid försöken var inte desamma.

#### **B.1.1 Beskrivning av förbränningskammaren**

##### *Metanförsöken*

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 mineralullisulering. För att få de ventilationsförhållanden som önskades justerades höjden och bredden på öppningen med hjälp av mineralullskivorna. Bredden på öppningen varierades mellan 0.08 och 0.25 m och höjden mellan 0.25 och 0.50 m. Dessutom varierades 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 och koncentrationen av CO, CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub> med en prob. Över kammaren fanns en huv för att samla upp och analysera brandgaserna som lämnade kammaren så att bl.a. RHR kunde beräknas.



Figur B.1, Försökupställningen för metanförsöken. Förbränningskammaren ses i bakgrunden under huvan och analysinstrumenten till höger.

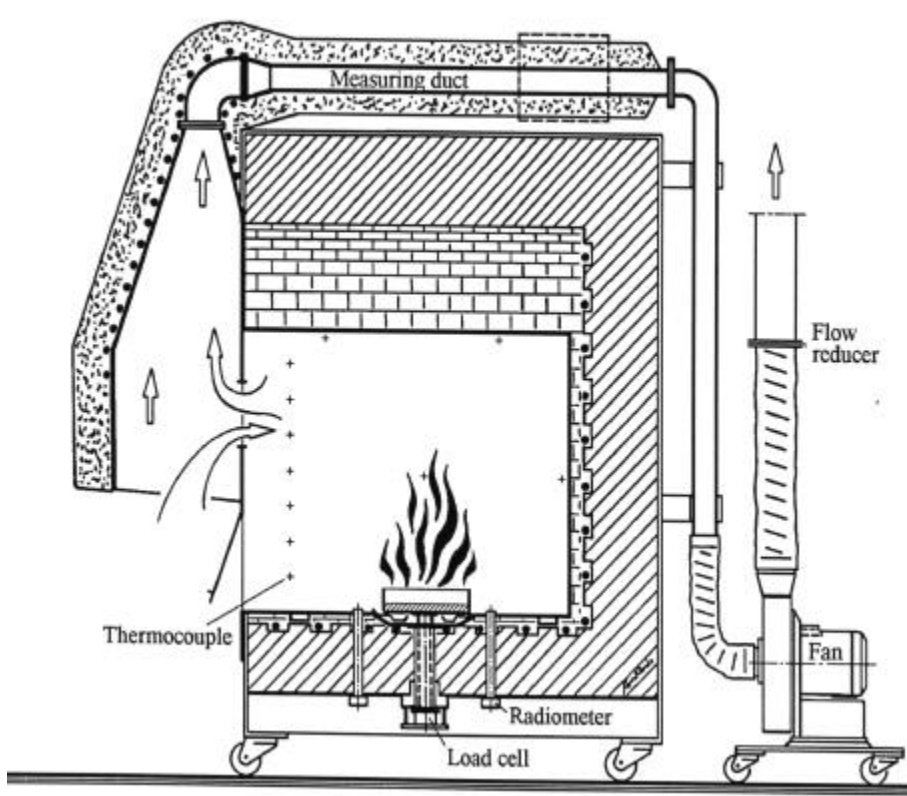
### *Heptanförsöken*

Denna försöksserie skiljer sig lite från metanserien med avseende på själva försökupställningen; dessutom utfördes fler mätningar. Förbränningsrummet som användes för dessa försök var uppbyggt av eldfast tegel på insidan klätt med en tunn plåt av rostfritt stål. Rummet var i stort sett av samma storlek som det som användes i metanförsöken och hade 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 erhöles. I denna serie varierades bredden mellan 0.05 och 0.46 meter och höjden mellan 0.20 och 0.66 meter.

Inne i förbränningskammaren fanns möjlighet att mäta temperaturer, strålning, massförlust och koncentration av CO, CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub> med hjälp av en prob. Istället för att placera hela förbränningskammaren under en huv användes en mindre huv som var monterad på förbränningskammarens framsida.



Figur B.2, Principskiss över försöksupställning vid heptanförsöken /B.1/.

### B.1.2 Mätning av massflöde

#### *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 därefter beräknas som ett medelvärde mellan närliggande mätpunkter.

#### *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 keramisk stång. Denna lösning gjordes för att så mycket som möjligt förhindra termisk påverkan.

### B.1.3 Mätning av temperatur

#### *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 jämnt 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.

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

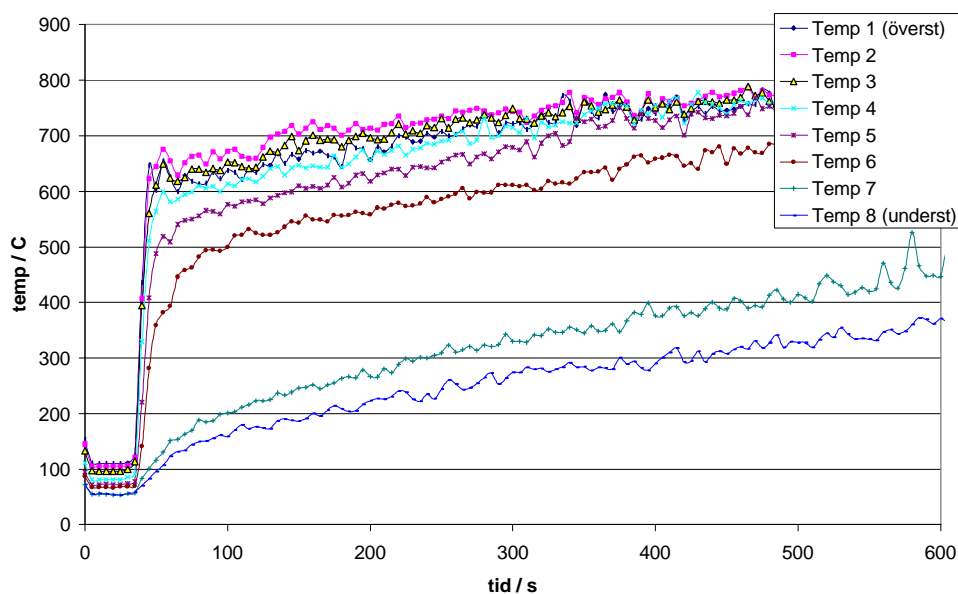


Diagram B.1, En typisk temperaturgradient från försöken.

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 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.

#### Heptanförsök

I heptanförsöksserien fanns det totalt 21 termoelement placerade inuti brandrummet. Åtta av dessa var placerade i en vertikal rad jämnt 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 respektive plats. Slutligen fanns sju termoelement placerade vertikalt i öppningen för att mäta gastemperaturen på brandgaserna som lämnar kammaren samt temperaturen på inströmmande luft.

#### B.1.4 Mätning av brandgaser

Koncentrationen av  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , och  $\text{O}_2$  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  $\text{CO}$ -koncentrationen över mätinstrumentens 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 nära ena hörnet långt in i kammaren. I några enstaka försök placerades den längre ner i en 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 man ville undvika att den placerades mitt i flammen. Probens placering ändrades även vid några försök, där det i övrigt rådde likartade förhållanden, för att man skulle 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 avvikelse som kunde uttydas var lägre koncentrationer närmast öppningen i försökens inledningsskede.



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

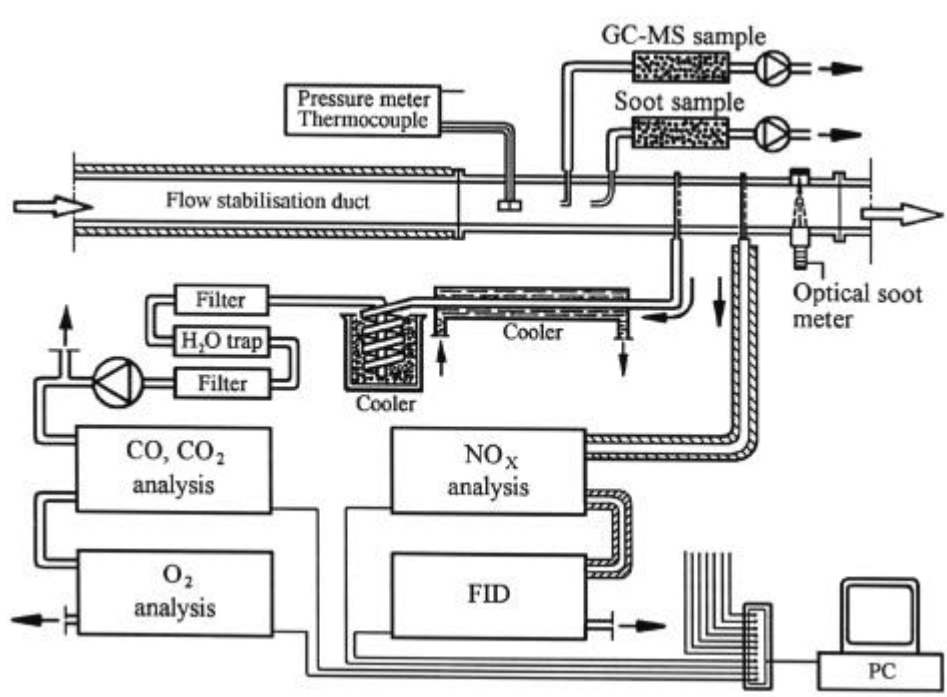
### **B.1.5 Mätning av förbränningsgaser**

För beräkning av RHR och yielder av förbränningsprodukter m.m., 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 utgörs av en s.k. stabiliseringssektion för att stabilisera flödet av brandgaser. 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  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  och HC (oförbrända kolväten). Dessa värden används sedan för att bestämma exempelvis RHR och yielder för de olika förbränningsprodukterna.

Nedan visas en schematisk bild över mätutrustningen i avgaskanalen.



Figur B.4, Schematisk bild över mätutrustning i avgaskanalen. Vid metanförsöken användes endast den del som analyserar  $CO$ ,  $CO_2$  och  $O_2$ , tryckmätare samt termoelement /B.1/.

Vid koncentrationsbestämning av  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  och HC samlas gas kontinuerligt upp i kanalen av proven 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-koncentration.

För vidare specifikation av mätutrustningen som typ av utrustning, mätområde och noggrannhet hänvisas till /B.1/.

## B.2 Begränsningar vid försök

I de båda försöksserierna finns naturligtvis en rad begränsningar.

### B.2.1 Heptanserien

I detta försök eldades heptan i ett kärl placerat centralt i rummet i golvnivå. Kärllets 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 bensen. 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, men detta sker 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 att 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 att tillföras det övre brandgaslagret från flera ställen, och inte som i försöket enbart från kärlet med bränsle.

### **B.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 brännarearea. 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 möjlighet 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.

### **B.3 Referenser**

/B.1/ Andersson, B., Baubrauskas, V., Holmstedt, G., Särdaqvist, S., Winter, G., Simulated Fires in Substances of Pesticide Type, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1996

## Appendix C: Omvandling av mätdata

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

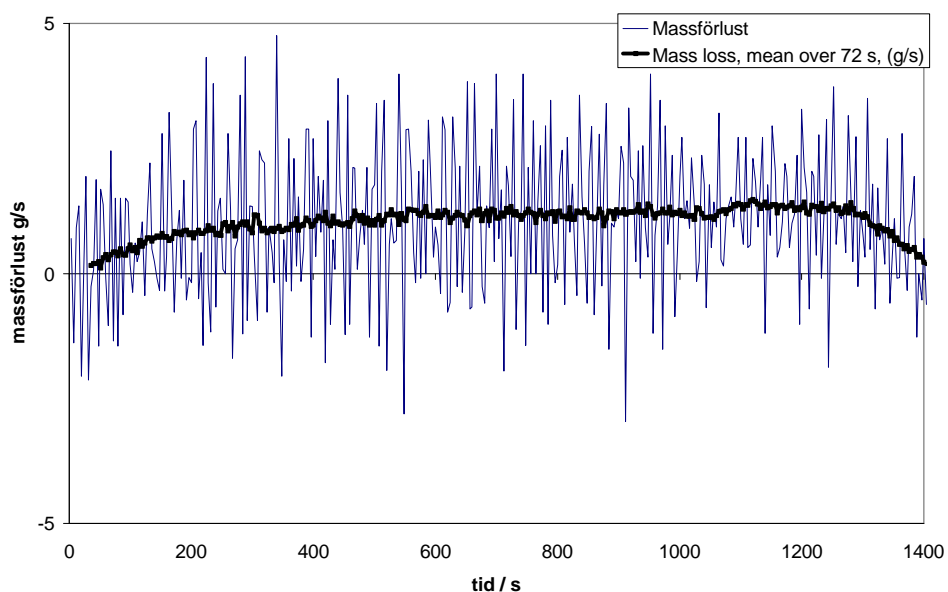
- massförlust av bränslet
- temperaturer
- $\Phi$ -värdet
- yielder CO, CO<sub>2</sub>
- RHR

### *C.1 Beräkning av massförlust*

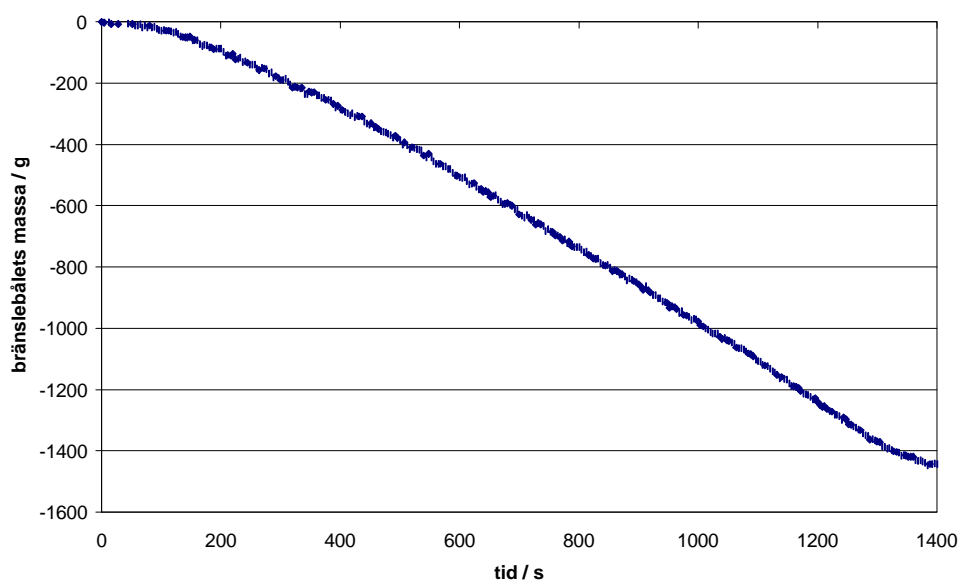
#### *Heptanserien*

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 för massförlusten varierar ganska mycket. För att motverka dessa fluktuationer beräknas massförlusten som ett medelvärde över en tid på 72 sekunder (se figur C.1 och C.2).



Figur C.1, Jämförelse av massförlusten beräknat via varje mätvärde samt som ett medelvärde över 72 sekunder (heptanförsök 9).



Figur C.2, Bränslebålets massa som en funktion av tiden (heptanförsök 9).

Figur C.1 och C.2 visar att massförlusten är ganska konstant, vilket medför att man kan använda ett medelvärde över en längre tid utan att få alltför stora fel vid en beräkning av massförlusten.

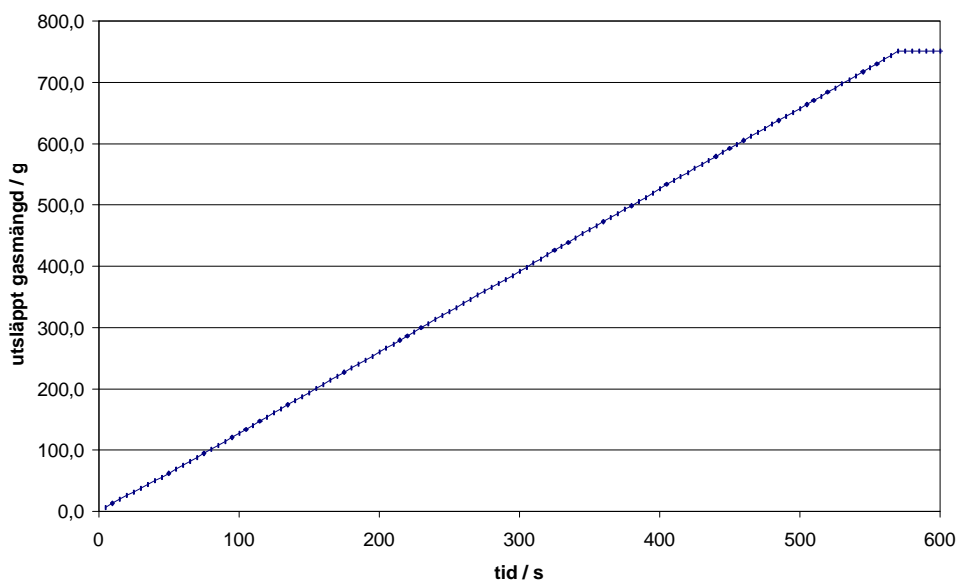
### Metanserien

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 dock inte kopplas till dator varvid mätvärdena fick avläsas manuellt och antecknas var 15:e sekund under försöken. Vågens noggrannhet är 1 gram. I vissa

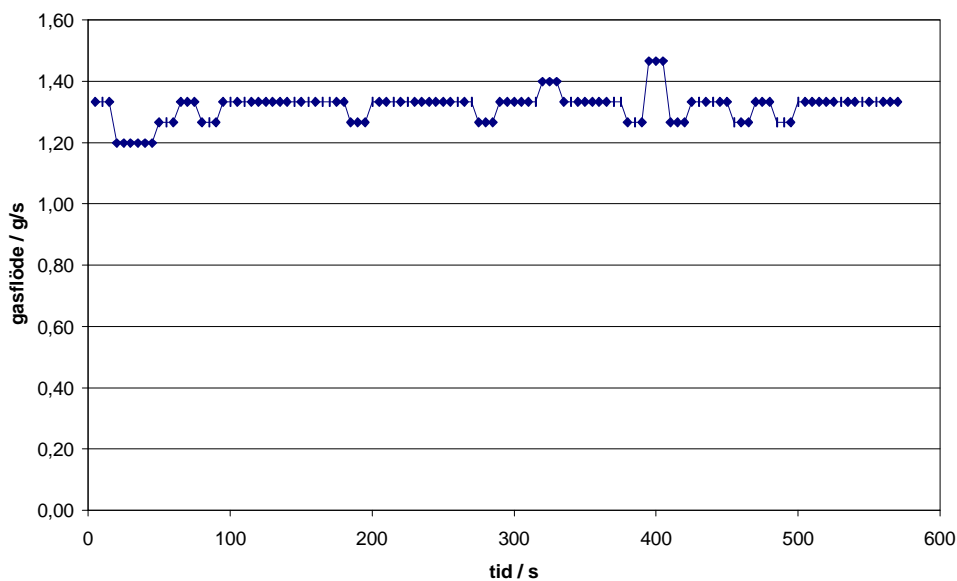
försök var gasflödet konstant under hela försöket, men här lästes vågen av ändå för att ha en koll på flödet. Dessa mätvärden bearbetades sedan i kalkyprogram. Den totala utsläppta gasmängden skrevs in vid respektive tidpunkt som den var avläst. Med hjälp av dessa räknades sedan gasflödet per sekund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

Dessutom beräknades ett medelvärde för hela försöket, vilket framförallt är användbart i de försök där massflöde var konstant under hela försöket. Massflödet har framförallt betydelse när  $\Phi$ -värdet skall beräknas.

Figur C.3 och C.4 visar 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.



Figur C.3, Utsläppt gasmängd för försök metan 9.



Figur C.4., Gasflöde från försök metan 9.

Den variation av gasflödet som kan utläsas av diagrammet ovan är snarare ett resultat av den mänskliga faktorn än en faktisk 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.

### C.2 Beräkning av medeltemperatur i övre brandgaslagret

Beräkning av den temperatur som används som referenstemperatur för det övre brandgaslagret beräknas enligt nedan:

$$T_g = \frac{\sum_{i=1}^4 T_i}{4} \quad \text{Ekvation C.1}$$

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 s.k. *mean corner temperature* är en generellt vedertagen metod.

### C.3 Beräkning av ekvivalenskvot (*F*-värde)

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

Ekvivalenskvoten beräknas som redovisats i kapitel 4, men då förhållandena kan antas vara något så när stationära används massflöden istället för massa för att beskriva blandningen av bränsle och luft:

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_a}{r} \quad \text{Ekvation C.2}$$

där  $\dot{m}_f$  - bränsleflöde [kg/s]  
 $\dot{m}_a$  - luftflöde [kg/s]  
 $r$  - stökiometrisk kvot (bränsleberoende) [kg/kg]

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

Den stökiometriska kvoten,  $r$ , beräknas på samma sätt som visats i kapitel 4 och ger för de båda bränsletyperna som använts vid försöken följande värden på  $r$ :

Tabell C.1.

Bränsle	r (kg/kg)
Metan (CH <sub>4</sub> )	0,0584
Heptan (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	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 C.3:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d B r_a \sqrt{\frac{2(r_a - r_g)g}{r_a}} h^{3/2} \quad \text{Ekvation C.3}$$

där  $\dot{m}_a$  - luftflödet in i den nedre delen av öppningen [kg/s]  
 $B$  - öppningens bredd [m]  
 $C_d$  - kontraktionsfaktorn för inströmmande gas [0,68]  
 $\rho_a$  - inströmmande lufts densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_g$  - brandgaslagrets densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  - tyngdaccelerationen [9,81 m/s<sup>2</sup>]  
 $h$  - höjden från öppningens botten till neutralplanet [m]

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

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{r_a}{r_g}\right)^{1/3}} \quad \text{Ekvation C.4}$$

där  $H$  - öppningens totala höjd [m]

Kombineras sedan ekvation C.3 och C.4 samt antag att öppningsarea  $A = B \times H$ , kan ett uttryck för massflödet av luft in i brandrummet erhållas enligt följande:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d A \sqrt{H} \sqrt{2g} r_a \sqrt{\frac{(r_a - r_g) / r_a}{\left[1 + \left(\frac{r_a}{r_g}\right)^{1/3}\right]^3}} \quad \text{Ekvation C.5}$$

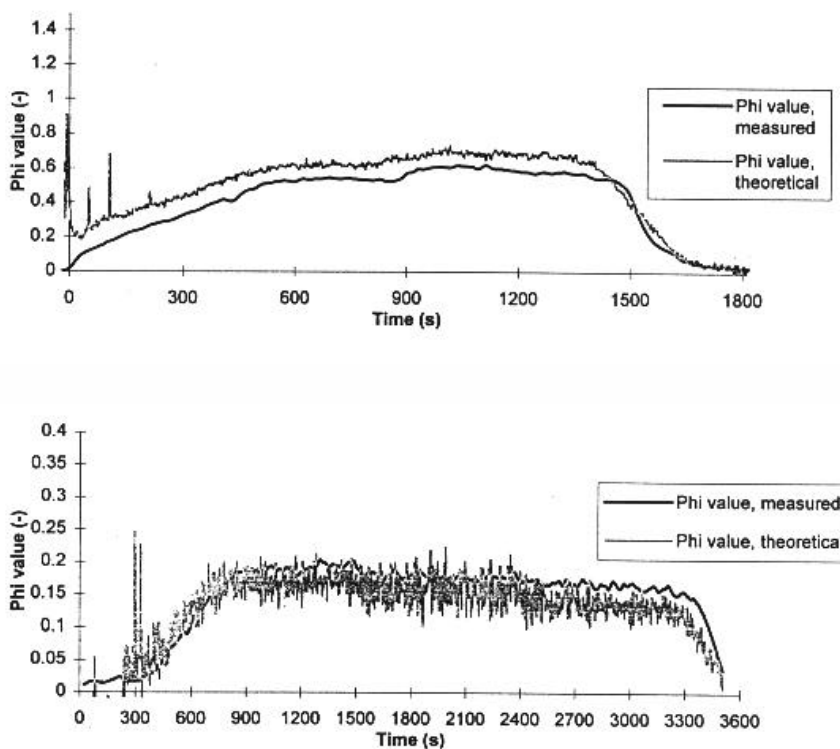
där  $A$  - öppningens totala area [m<sup>2</sup>]

Om man dessutom utnyttjar det faktum att densiteten kan ersättas med temperaturen istället med hjälp av allmänna gaslagen, kan man med lite omskrivning uttrycka ekvation C.5 enligt följande:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d A \sqrt{H} \sqrt{2g} \frac{353}{T_a} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right)}{\left(1 + \left(\frac{T_g}{T_a}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^3}} \quad \text{Ekvation C.6}$$

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

Ekvation C.6 är det slutliga uttrycket som används för beräkning av  $\Phi$ -värdet enligt ekvation C.2. Att bestämma  $\Phi$ -värdet på detta sätt ger en god approximation jämfört med att mäta det exakt med speciell utrustning. I figur C.5 och C.6 kan skillnaden mellan uppmätt och beräknat  $\Phi$ -värde utläsas.



Figur C.5, och C.6, Jämförelse av  $\Phi$ -värden, uppmätta med speciell  $\Phi$ -mätare respektive beräknade /C.1/.

Då skillnaden mellan uppmätt och beräknat  $\Phi$ -värde är relativt liten ansågs att en direkt mätning av  $\Phi$ , vilket kräver en relativt komplicerad experimentell utrustning, inte var nödvändig /C.1/.

### C.4 Beräkning av yielder

I denna rapport har yielder ej använts. Yielder är dock normalt ett vanligt sätt att presentera resultat.

### C.5 Beräkning av RHR

Effektutvecklingen under försöken beräknades enligt den s.k. syreförbrukningsmetoden (*Oxygen Consumption Method*). Denna bygger på att frigjord energi per massenhet syre som förbrukas vid en förbränning är konstant; ca 13,1 MJ per 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, CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub>

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 appendix B.

Volymflödet vid STP beräknas enligt följande:

$$\dot{V} = A \times v \quad \text{Ekvation C.7}$$

där  $\dot{V}$  - volymflödet i kanalen [m<sup>3</sup>/s]  
 $A$  - kanalens tvärsnittsarea [m<sup>2</sup>]  
 $v$  - gashastigheten i kanalen [m/s]

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

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_g}} \quad \text{Ekvation C.8}$$

där  $\Delta p$  - tryckskillnad [Pa]  
 $\rho_g$  - gasernas densitet [kg/m<sup>3</sup>]



Genom att man mäter temperaturen i kanalen kan gasdensiteten ( $r_g$ ) bestämmas. Till detta kommer att volymflödet dessutom skall 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:

$$\dot{V} = A \times \frac{k_1}{k_2} \times \frac{1}{r_{298}} \times \sqrt{\frac{2\Delta p T_0 r_0}{T_g}} \quad \text{Ekvation C.9}$$

- 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]  
 $r_{298}$  - luftens densitet vid 298 K [1,185 kg/m<sup>3</sup>]  
 $T_0$  - omgivande lufts temperatur [K]  
 $\rho_0$  - omgivande lufts densitet [kg/m<sup>3</sup>]

I och med att förhållandet mellan omgivande lufts temperatur och densitet är någorlunda konstant, med förhållande enligt ekvation C.10, kan ekvationen för volymflödet förenklas ytterligare.

$$\frac{\sqrt{2T_0 r_0}}{r_{298}} = 22,4 \quad \text{Ekvation C.10}$$

$$\dot{V} = A \times \frac{k_1}{k_2} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{T_g}} \times 22,4 \quad \text{Ekvation C.11}$$

Eftersom även CO<sub>2</sub> och CO mättes i kanalen tas det även hänsyn till dessa produkter när effektutvecklingen beräknas. Följande ekvationer används vid beräkningarna:

$$\dot{Q} = \left[ E\Phi - (E_{CO} - E) \frac{(1-\Phi)}{2} \frac{X_{CO}^g}{X_{O_2}^g} \right] \frac{\dot{V} r_g}{1 + \Phi(a-1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}) X_{O_2}^0$$

Ekvation C.12

Med:

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^0 (1 - X_{CO_2}^g - X_{CO}^g) - X_{O_2}^g (1 - X_{CO_2}^0)}{(1 - X_{O_2}^g - X_{CO_2}^g - X_{CO}^g) X_{O_2}^0} \quad \text{Ekvation C.13}$$

- där  $E$  - energin som utvecklas per massenhet förbrukat syre [13,1MJ/kg]  
 $E_{CO}$  - energin per massenhet syre förbrukat för oxidation av CO till CO<sub>2</sub>[17,6MJ/kg]  
 $X_i^g$  - uppmätt volymfraktion av ämnet  $i$  i avgaskanalen,  
 $i=(CO, CO_2$  och  $O_2)$   
 $X_i^0$  - uppmätt volymfraktion av ämnet  $i$  i omgivningen (luften)  
[här20,9% O<sub>2</sub>] [0% CO<sub>2</sub>]  
 $a$  - expansionsfaktorn för luft som förlorar sitt syre [här 1,1]  
 $\dot{V}$  - volymflödet i kanalen enligt ekv 21 [m<sup>3</sup>/s]  
 $M_{O_2}$  - molvikten för syre [32,0 kg/kmol]  
 $M_a$  - molvikten för luft [28,9 kg/kmol]  
 $X_{H_2O}$  - molfraktionen vattenånga i förbränningsluften [här 0,002]

### C.6 Beräkning av förbränningseffektivitet

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

$$c = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f \times \Delta H_C} \quad \text{Ekvation C.14}$$

- där  $\dot{m}_f$  - massflödet av bränslet [kg/s]  
 $\Delta H_C$  - teoretiska förbränningsvärmets för metan [här 50 MJ/kg]

### C.7 Referenser

/C.1/ Andersson, B., Baubrauskas, V., Holmstedt, G., Särdaqvist, S., Winter, G., Simulated Fires in Substances of Pesticide Type, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1996

## Appendix D: Beräkningsmetod för antändning av brandgaslagret - Beylers metod

### D.1 Inledning

I de inledande kapitlen om kemiska processer och övertändning, kapitel 4 och 5, 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 diffusionsflammar /D.1/. Nedan beskrivs varför.

Simmons och Wolfhard utförde experiment med diffusionsflammar där de mätte molfraktionen syre i den oxiderande luftströmmen. Vid flammans brännbarhetsgräns erhöles då ett s.k. *limiting oxygen index*, d.v.s. minsta mängd syre som krävdes för att flammen skulle kunna brinna. Vidare upptäcktes att detta index gav samma värde som för det stökiometriska fallet med förblandade gaser så länge bränslet var det samma. Molfraktionen syre blev alltså densamma i 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 till bestämning av ett brandgaslagers brännbarhet har presenterats av Gottuk /D.2/.

### D.2 Teori

#### D.2.1 Grunderna för Beylers ekvation

Beylers modell är grundad på Le Chateliers lag, ekvation D.1, som utvecklades så tidigt som i slutet av 1800-talet grundad på empiriska erfarenheter.

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{SL_i} \right) \geq 1 \quad \text{Ekvation D.1}$$

där  $C_i$  - volymförhållande bränsle  $i$ /luft [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]  
 $SL_i$  - volymförhållande bränsle  $i$ /luft vid stökiometrisk blandning  
 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

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 D.1 skrivas om enligt ekvation D.2.

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i \Delta H_{c,i}}{\int_{T_0}^{T_{f,SLi}} n_p C_p dT} \geq 1 \quad \text{Ekvation D.2}$$

- där  $C_i$  - volymförhållande bränsle  $i$ /luft vid stökiometrisk blandning [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $\Delta H_{c,i}$  - förbränningsvärme för bränsle  $i$  [kJ/mol]  
 $T_{f,SLi}$  - adiabatisk flamtemperatur vid stökiometrisk bränsle/luftblandning för bränsle  $i$  [K]  
 $T_0$  - initialtemperatur för bränsle/luftblandning [K]  
 $n_p$  - molförhållande produkter/reaktander vid stökiometri [mol/mol]  
 $C_p$  - värmekapacitet [kJ/mol K]

Med andra ord uttrycks koncentrationen 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 D.2.

### D.2.2 Beylers förenkling

Beylers förenkling består i att generalisera ekvation D.2 genom att använda begreppet ekvivalenskvot, eller  $\Phi$ -värdet som det kallas i den här rapporten.  $\Phi$ -värdet har tidigare definierats i kapitel 4, och ges av ekvation D.3.

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a r} \quad \text{Ekvation D.3}$$

$$r = \left( \frac{m_f}{m_a} \right)_{\text{Stökiometri}} \quad \text{Ekvation D.4}$$

- 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]

$\Phi$ -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 brandgaslagret, som därmed inte heller kan bli brännbart. När  $\Phi$ -värdet är större än 1 råder ventilationskontroll, d.v.s. det frigörs mer bränsle än

vad det finns syre tillgängligt för att förbränna detta fullständigt. I dessa fall kommer således oförbrända gaser ansamlas i brandgaslagret i form av framförallt kolväten och kolmonoxid. Blir koncentrationen tillräckligt hög blir brandgaslagret antändbart. Massfraktionen bränsle i brandgaslagret ges av ekvation D.5 /D.3/.

$$Y_f = \frac{1 - 1/\Phi}{1 + 1/(\Phi r)} \quad \text{Ekvation D.5}$$

där  $Y_f$  - massförhållande bränsle/total massa i brandgaslagret

För att kunna tillämpa  $\Phi$ -värdet måste dock ekvation D.2 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 kan beräknas. Denna approximation är godtagbar då de flesta kolväten har liknande fysikaliska data. Om värmekapaciteten dessutom antas vara konstant och inte förändras med temperaturen kan integralen ersättas med konstanta värden. I sin förenklade form lyder ekvation D.2 enligt ekvation D.6.

$$\frac{Y_f \Delta H_c}{m_p C_p (T_{SL} - T_0)} \geq 1 \quad \text{Ekvation D.6}$$

där  $\Delta H_c$  - förbränningsvärme för bränsle [kJ/kg]  
 $m_p$  - produkternas massa vid förbränning av 1 kg brandgaslager [kg]

Även ekvation D.6 innebär problem genom det att bränslet på något sätt måste bestämmas för att man skall få fram förbränningsvärme och masskvot. Därför används i stället det faktum att utvecklad energi är proportionerlig mot mängden förbrukat syre, ekvation D.7. Av samma skäl skrivs också masskvoten  $m_p$  om enligt ekvation D.8.

$$\Delta H_c = \frac{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}{r} \quad \text{Ekvation D.7}$$

där  $\Delta H_{O_2}$  - energikonstant grundad på syreförbrukning [13,4 MJ/kg]  
 $Y_{O_2}$  - massandel syre i inströmmande luft [kg/kg]  
 $r$  - bränsle/luft-förhållande vid stökiometri [kg/kg]

$$m_p = 1 + \frac{Y_f}{r} \quad \text{Ekvation D.8}$$

Med dessa båda omskrivningar i kombination med att massfraktionen bränsle i brandgaslagret kan uttryckas enligt ekvation D.5 erhålls slutligen Beylers ekvation för bestämning om ett brandgaslager är antändningsbart eller inte, ekvation D.9.

När uttrycket ger ett värde större än 1 är brandgaslagret enligt modellen antändningsbart, medan värden under 1 ger att gasblandningen inte ligger inom det brännbara området. Som synes tar modellen hänsyn till både koncentrationen oförbrända gaser och initialtemperatur i brandgaslagret.

$$\left( \frac{1 - 1/\Phi}{1 + r} \right) \left( \frac{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}{C_p (T_{SL} - T_0)} \right) \geq 1 \quad \text{Ekvation D.9}$$

- där  $\Phi$  - ekvivalenskvot [kg/kg]  
 $r$  - massförhållande bränsle/luft vid stökiometrisk blandning [kg/kg]  
 $\Delta H_{O_2}$  - energikonstant grundad på syreförbrukning [kJ/kg]  
 $Y_{O_2}$  - massandel syre i inströmmande luft [kg/kg]  
 $T_{SL}$  - adiabatisk flamtemperatur [K]  
 $T_0$  - initialtemperatur för blandning av bränsle och luft [K]

### D.2.3 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 brandgaslagret, samt  $\Phi$ -värdet. Därför kan ekvation D.9 med fördel förenklas ytterligare för praktiskt bruk genom att ett samband mellan dessa båda variabler, ekvation D.10, tas fram:

$$\Phi \geq \frac{1}{1 - \frac{(1+r)(T_{SL} - T_0)C_p}{\Delta H_{O_2} Y_{O_2}}} \quad \text{Ekvation D.10}$$

Om alla variabler utom ekvivalenskvoten och initialtemperaturen sätts till konstanter enligt tabell D.1 erhålls en mycket enkel funktion, som beskriver lägsta möjliga  $\Phi$ -värde vid en given temperatur som kan ge ett antändningsbart brandgaslager, ekvation D.11.

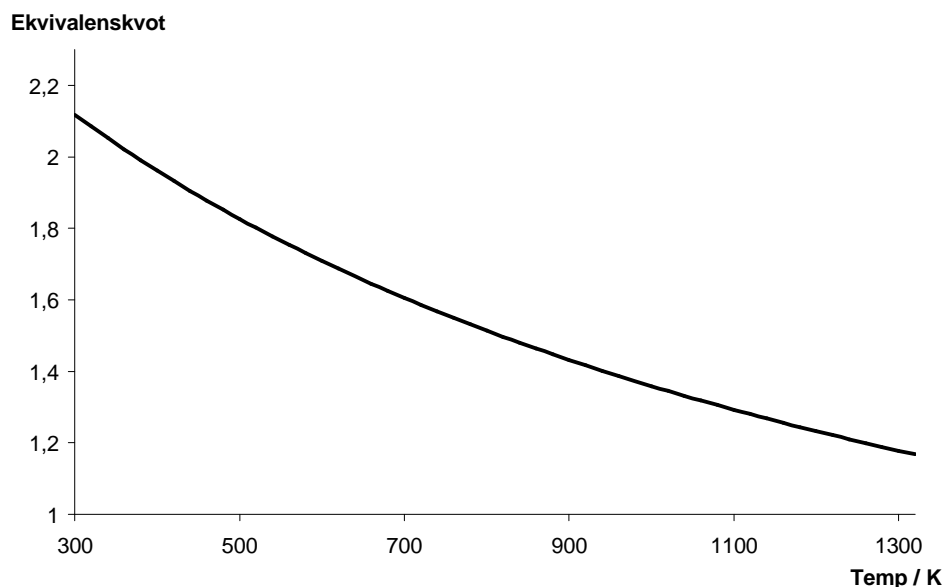
Tabell D.1. Representativa värden för förenkling av Beylers ekvation

Variabel	Värde
$r$	0,07
$T_{SL}$	1700 K
$C_p$	1,1 kJ/kgK
$\Delta H_{O_2}$	13,4 MJ/kg
$Y_{O_2}$	0,233

Nedanstående ekvation beskriver alltså sambandet mellan temperatur och  $\Phi$ -värde i brandgaslagret med villkoret att detsamma ska vara antändningsbart.

$$\Phi \geq \frac{1}{0,359 + 3,77 \cdot 10^{-4} T_0} \quad \text{Ekvation D.11}$$

Ekvation D.11 redovisas grafiskt i figur D.1. I diagrammet är gasblandningen i brandgaslagret antändningsbar när den befinner sig ovanför funktionen.



Figur D.1, Ekvivalenskvot vid antändning som funktion av brandgaslagrets temperatur.

#### D.2.4 Begränsningar för Beylers ekvation

Genom att studera Beylers ekvation kan genast en begränsning utläsas. Ekvivalenskvoten måste vara större än 1 för att uttrycket skall kunna bli positivt. Detta var ju också en av förutsättningarna i härledandet av ekvationen, att vid ekvivalenskvoter mindre än 1 anses inga oförbrända gaser nå brandgaslagret. En annan begränsning är att ekvationen är bränsleberoende. För normala kolväten kan standardvärdena i tabell D.1 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  $T_{SL}$  att anta helt andra värden. Även grundkonceptet med konstanta värden för värmekapacitet och förbränningsvärme ger en begränsning då bränslen med avvikande fysikaliska data används. Modellen tar heller inte hänsyn till den övre brännbarhetsgränsen.

#### D.3 Jämförelse beräkning/experiment

För att utreda hur bra Beylers ekvation fungerar i praktiken jämfördes den med de experiment som redovisats i appendix B. I försöken mättes ett stort antal parametrar varav endast vissa är intressanta vid beräkning av Beylers ekvation. De mätvärden som använts är ekvivalenskvoten  $\Phi$  och temperaturen i brandgaslagret  $T_0$ . Ekvivalenskvoten är ett beräknat värde grundat på en mängd parametrar, se kapitel 4, 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

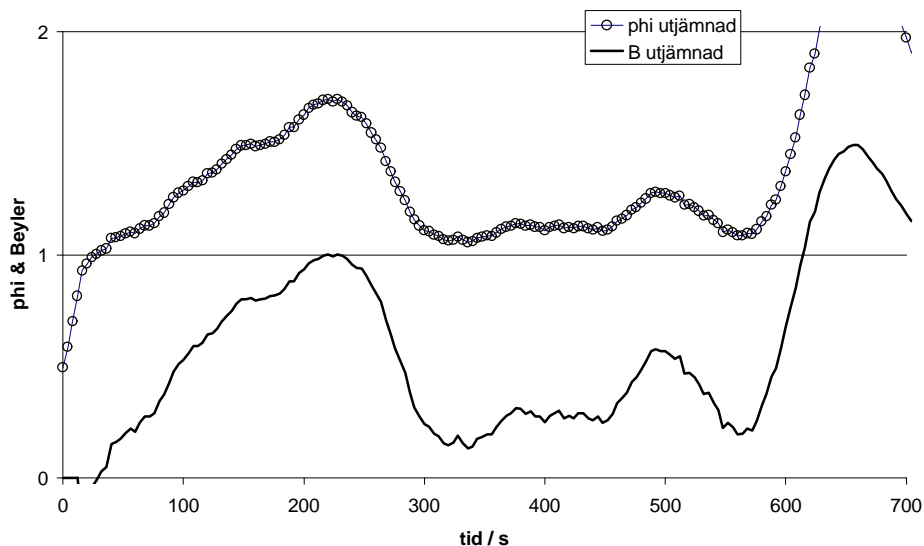
liknande. Dessa två variabler,  $T_0$  och  $\Phi$ , är de enda som tillåts variera under brandförloppet vid beräkningar med Beylers ekvation.

Bränslet som användes vid försöken var som bekant heptan respektive 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 D.2.3. Med dessa indata beräknades Beylers ekvation för var fjärde sekund under hela brandförloppet. En sammanställning över använda indata redovisas i tabell D.2.

Tabell D.2, Sammanställning av indata vid beräkningar med Beylers ekvation

	Värde	Anmärkning
F	Från mätresultat	Varieras under förloppet
$T_0$	Från mätresultat K	Varieras under förloppet
$r_{\text{heptan}}$	0,066 kg/kg	Konstant
$r_{\text{metan}}$	0,058 kg/kg	Konstant
$T_{SL}$	1700 K	Konstant
$C_p$	1,1 kJ/kgK	Konstant
$\Delta H_{O_2}$	13,4 MJ/kg	Konstant
$Y_{O_2}$	0,233 kg/kg	Konstant

Som tidigare nämnts är Beylers ekvation endast giltig när  $\Phi$ -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.



Figur D.2, Exempel på beräknade värden av Beylers ekvation tillsammans med motsvarande ekvivalenskvoter  $\Phi$ . Utjämnad i förklaringstexten för kurvorna innebär att kurvorna representerar ett medelvärde över 72 sekunder. Resultatet är hämtat från heptanförsök 10.

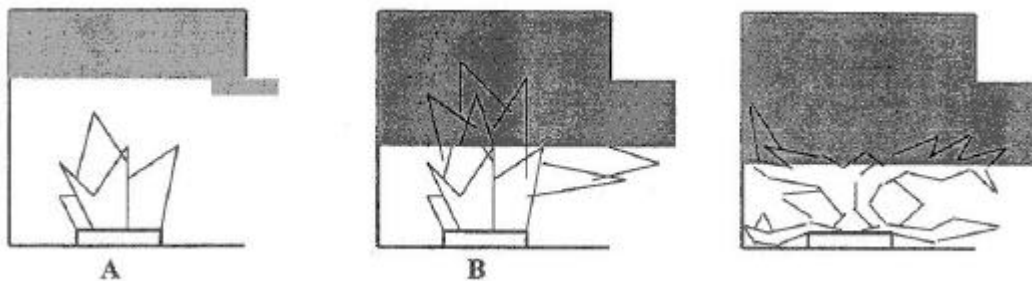
I figur D.2 som redovisar försök 10 i heptanserien ges ett exempel på hur Beylers ekvation och ekvivalenskvoten varierar under förloppet. I det här fallet är Beylers funktion giltig nästan i hela förloppet, d.v.s. ekvivalenskvoten är större än 1 under hela försöket förutom de första 25 sekunderna. Alltså 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 sekunder enligt Beylers ekvation. Även vid ca 240 sekunder går funktionen väldigt nära 1 vilket skulle kunna innebära att risk för antändning av brandgaslagret föreligger även vid denna tidpunkt.

### D.3.1 Jämförelse med det visuella intrycket

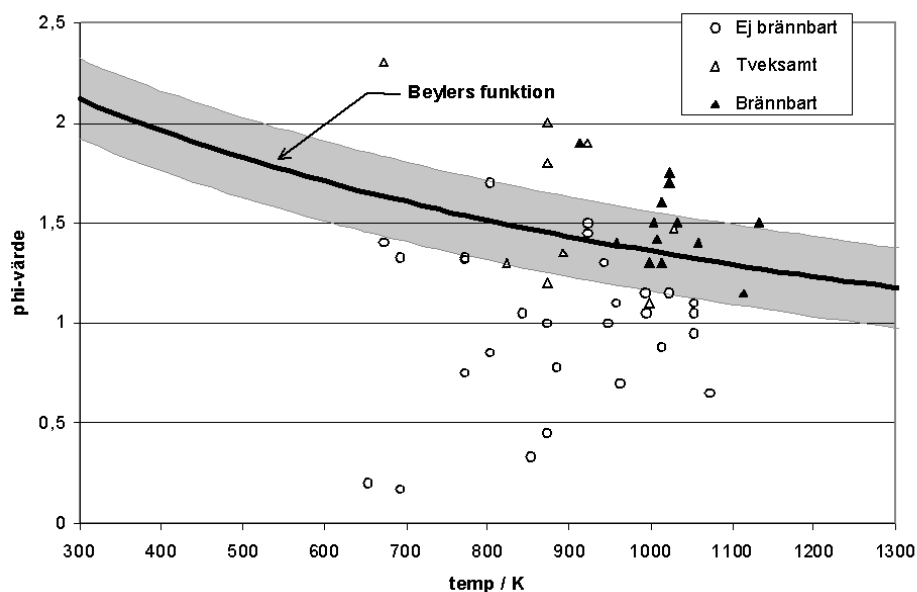
Beräkningarna av Beylers ekvation enligt föregående kapitel jämfördes sedan med de visuella intryck som uppfattades vid försöken. Detta innebär att man genom att studera försöken, både under försökens gång och med hjälp av video, avgjorde i vilka av dessa som brandgaslagret antändes och i så fall när. 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 D.3.



Figur D.3, Principiell beskrivning av brandförlopp i försök:

- A. I försökets inledningskede brinner gasen från brännaren relativt obehindrat 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 lågsamma 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. där 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 brandgaslagret. I vissa försök kommer 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 ovanför 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 temperaturer på uppemot 900°C uppnåts i brandrummet.

Svårigheten att avgöra om brandgaslagret brann eller inte gjorde att ett antal försök bedömdes som tveksamma. För att åskådliggöra resultaten av iakttagelserna plottades utfallet, d.v.s. om brandgaslagret brann eller inte, i ett diagram med ekvivalenskvoten som funktion av temperaturen tillsammans med Beylers funktion, figur D.4. Ett värde ovanför Beylers funktion i diagrammet motsvarar att denna ger ett värde större än 1 och därmed ett brännbart brandgaslager.



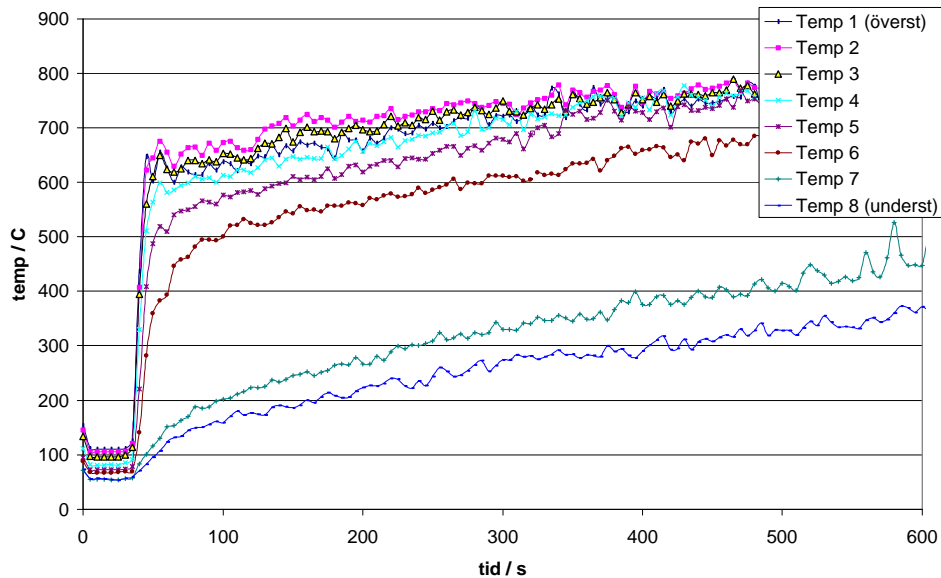
Figur D.4, Utfall av metanförsöken med avseende på om brandgaslagret var brännbart eller ej.

Som synes är inte Beylers funktion helt obefogad. Det är utan tvekan i funktionens närhet som brandgaslagret går från icke 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 författarens uppfattning rör det sig snarare om ett intervall som t.ex. skulle kunna motsvaras av det skuggade partiet i figur D.4. Avvikelser från Beylers ekvation upplevdes framför allt vid höga temperaturer då det i ett antal försök ansågs att brandgaslagret brann utan att Beylers ekvation gav värden större än 1. Vid lägre temperaturer var upplevelsen den motsatta. Försök som bedömdes som tveksamma huruvida brandgaslagret var brännbart eller inte skulle enligt Beylers ekvation vara klart brännbara.

### D.3.2 Förändring av temperaturprofilen vid antändning

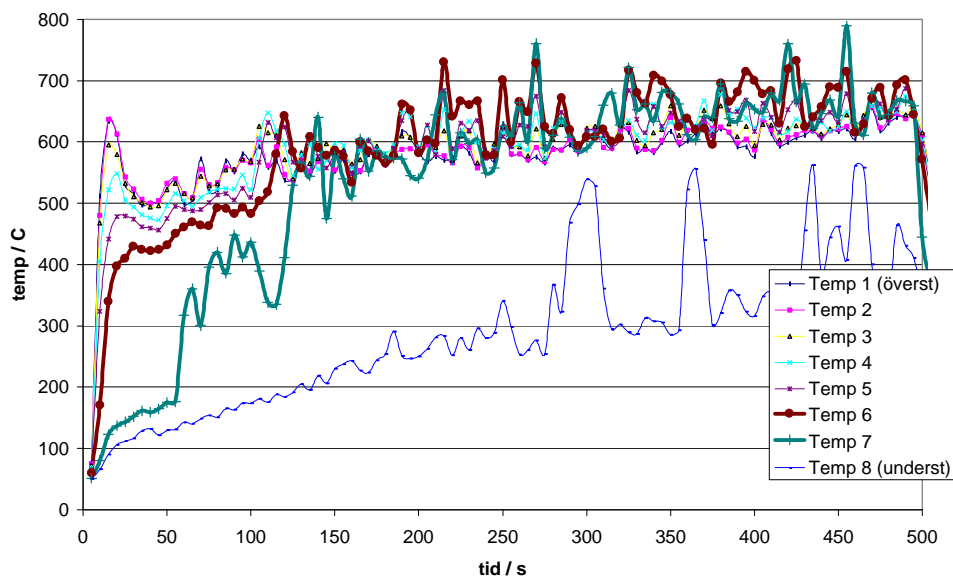
En annan intressant iakttagelse med avseende på temperaturens utveckling gjordes i de försök där brandgaslagret antändes. Som bekant användes ett träd med åtta termoelement placerade med jämna vertikala avstånd för att bl.a. beräkna den s.k. *mean corner temperature*. Vid vidare studier av temperaturutvecklingen 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 där 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 figur D.5.



Figur D.5. Exempel på temperaturdiagram där brandgaslagret inte antänds, hämtat från metanförsök 2. Lägg märke till att kurvorna i stort sett aldrig korsar varandra under förloppet; det är alltså 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 figurena). Efter detta stadium följer en svårtydd temperaturprofil där den inbördes ordningen 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 figur D.6.



Figur D.6, 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 sekunder antänds brandgaslagret och temperaturen i dessa båda termoelement stiger kraftigt och ger i resterande delen av försöket de högsta temperaturerna.

### D.3.3 Slutsats

Försöken visade att Beylers ekvation på ett bra sätt förutspådde om brandgaslagret skulle bli brännbart eller inte, något som i förlängningen kan användas för att bestämma om risk för övertändning föreligger då dessa begrepp är tätt sammankopplade. Dock vill författaren reservera sig 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  $\Phi$ -värdet ägnas intresse då det är denna parameter som har störst betydelse för resultatet. Man kan antingen anta  $\Phi$ -värdet, eller också kan t.ex. datorprogrammet CFAST användas för att räkna fram detta med goda resultat. En mindre variation av uppskattad temperatur får endast begränsad effekt på resultatet.

### D.4 Referenser

/D.1/ Simmons, R.F., Wolfhard, H.G., Combustion and Flame 1957

/D.2/ Gottuk, D.T., Roby, R.J., "Effect of Combustion Conditions on Species Produktion", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition 1995

/D.3/ Karlsson, B., Quintiere, J.G., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997

## Appendix E: Beräkningsmetod - FLASHOVER. A1

En annan metod för att beräkna om risk för övertändning föreligger är att använda datorprogrammet Flashover A1. Modellen som presenterades 1994 är resultatet av ett samarbete mellan Alan Beard, Dougal Drysdale, Paul Holborn och Steven Bishop vid universitetet i Edinburgh. 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* /E.1/.

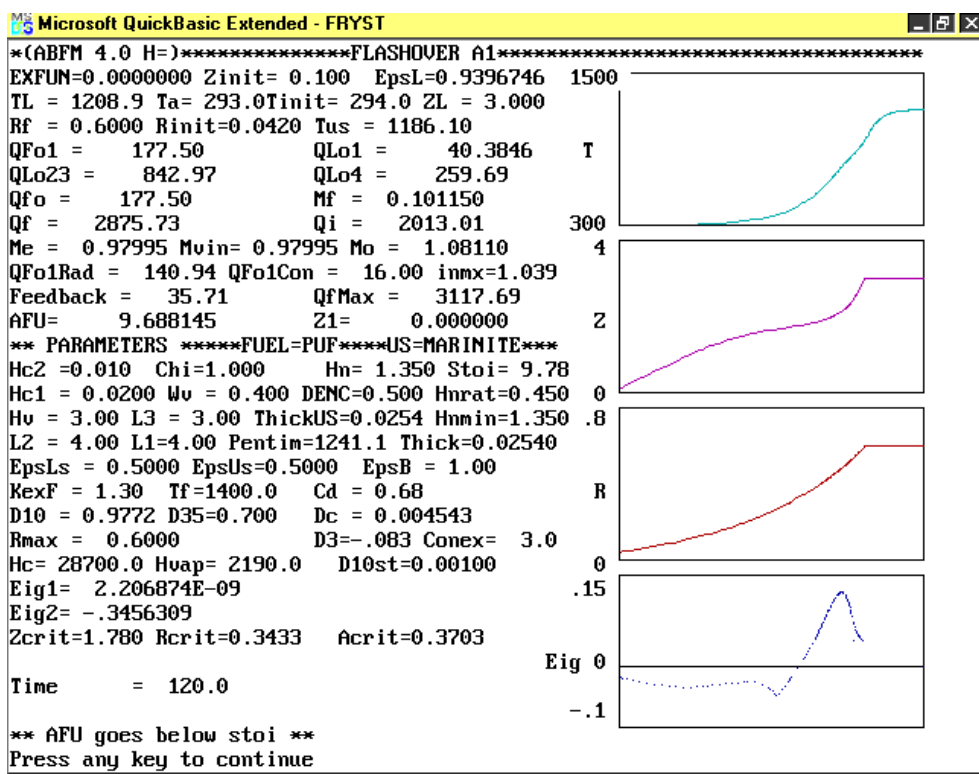


Figur E.1, Skärmbild från Flashover A1 visande en del av de underprogram, *subs*, som används i programmet.

### E.1 Teori

Flashover A1 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 mass- och energibalanskvationer. Modellen tar hänsyn till fenomen som återstrålning från det varma brandgaslagret, insugning av luft i plymen, massflöden in och ut genom öppningen m.m. Bränslet kan definieras med 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 E.2, Skärmbild från resultatet av en simulering med Flashover A1 hämtad 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 att 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.

## E.2 Synpunkter

### E.2.1 Användarvänlighet

Programmet är som tidigare nämnts skrivet för programmeringsspråket QuickBasic. Detta något föråldrade språk i kombination med att det inte finns någon användarmanual gör att programmet Flashover A1 är sällsynt svårt att arbeta med. Som exempel kan nämnas att inte finns någon 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 skall justera är mer eller mindre svårförståeliga. Ett exempel på detta ges i figur E.3.

```

Microsoft QuickBasic Extended
File Edit View Search Run Debug Calls Utility Options Help
FLASH_A1.BAS:Parameters
Conex = 3?      'Used in SUB for Me      Usual value 3

'***** For Fire Eqn 1 *****
KexL = 1.3      '** Extinction Coefficient of Layer
LenC = 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 material
                    '**kW/m/K Marinite.
'ThermCond = .00069 '** Brick
'ThermCond = .0011 '** Concrete

Thick = .0254  '** Physical thickness of upper surface boundaries (m)
                    '** Thickness of Marinite board in Fac Mut tests=.0254
'Thick = .06   '** Typical brick (approx-check)
'Thick = .146  '** Tomorrows World average thickness(garage,Nov 1994)

----- Immediate -----
<Shift+F1=Help> <F6=Window> <F2=Subs> <F5=Run> <F8=Step> | N 00020:001

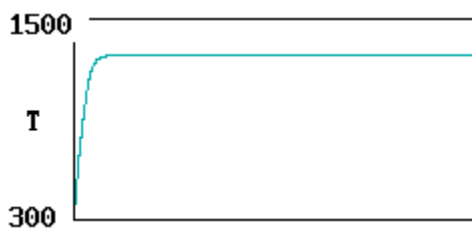
```

Figur E.3, Skärmbild från sub "parameters". Det är i subs som denna indata definieras 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 differentialekvationerna. Trots en någorlunda snabb dator, PC pentium 200, blev simuleringstiderna i vissa fall uppemot 15 minuter 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.

## E.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 sekunder, se figur E.4. En övertändning skulle enligt modellen vara förestående när brandens radie var 0,15 m och brandgaslagrets djup ca 0,3 m, något som inte alls stämde överens med varken uppmätta värden eller visuellt synintryck vid försöken.



Figur E.4, Temperaturkurva [K] från simulering av heptanförsök 3 med Flashover A1. Diagrammets hela längd motsvarar 120 sekunder. 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 scenarier 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 m<sup>3</sup> rumsvolym, var skillnaderna mindre, men tendenserna var fortfarande desamma. Det visade sig också att resultaten blev betydligt mer trovärdiga för 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 erhöles tipset att man skulle gå in och ändra i själva programmet för att korrigera icke 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 får konstateras vara orimligt höga värden; i synnerhet i början av en rumsbrand kommer dessa båda parametrar vara betydligt lägre.

### E.3 Slutsats

Flashover A1 lämpar sig inte som ett ingenjörswerktyg. Att ha en datormodell som måste programmeras om för varje unik situation ger både alltför stor beräkningsosäkerhet och alltför 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.



Om det funnits en manual till programmet hade säkert ett flertal av de problem som uppkommit gått att korrigera. Det verkar för övrigt som om det är enklare att simulera bränsle som har ett relativt högt värde på förångningen, exempelvis trä, jämfört med lättflyktiga bränslen som heptan. Problemet med modellen är troligtvis återstrålningsmodellen. I de flesta fall uppkommer för hög värden för massförlusten från bränsleytan, vilket resulterar i för hög temperaturer på mycket kort tid.

#### ***E.4 Referenser***

/E.1/ 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

## Appendix F: Beräkningsmetod - CFAST

### *F.1 Inledning*

Metoden att använda temperaturer från tvåzonsmodellen CFAST direkt för att bedöma när övertändning i ett rum sker, t.ex. när temperaturen överstiger 500°C, används av många runt om i världen. Frågan är huruvida detta ger en vettig bedömning eller inte. Detta avsnitt kommer att diskutera om så är fallet. Jämförelsen sker genom att temperaturen i brandrummet beräknas med hjälp av datorprogrammet CFAST och resultatet jämförs med uppmätta data från försöken. Huruvida temperatur är ett bra kriterium för att uppskatta risken för övertändning diskuteras i avsnitt F.4.

### *F.2 Beskrivning av Hazardpaketet*

Hazardpaketet är en datormodell utvecklad 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 Cplot, slutligen, är ett program som omvandlar utdatan från CFAST till datafiler, diagram m.m. I denna rapport har Hazard I version 1.2 använts inkluderande CFAST 2.0 /F.1/.

#### **F.2.1 CFAST**

CFAST är en så kallad tvåzonsmodell som bygger på att varje rum är uppdelat i två kontrollvolym: 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 genom iteration mass- och energibalanskvationer för de olika kontrollvolymerna för varje tidssteg. Upp till 15 rum med öppningar sinsemellan kan simuleras i programmet. Resultatet kan dock inte anses vara tillfredsställande i fler än några rum.

#### **F.2.2 CEdit**

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

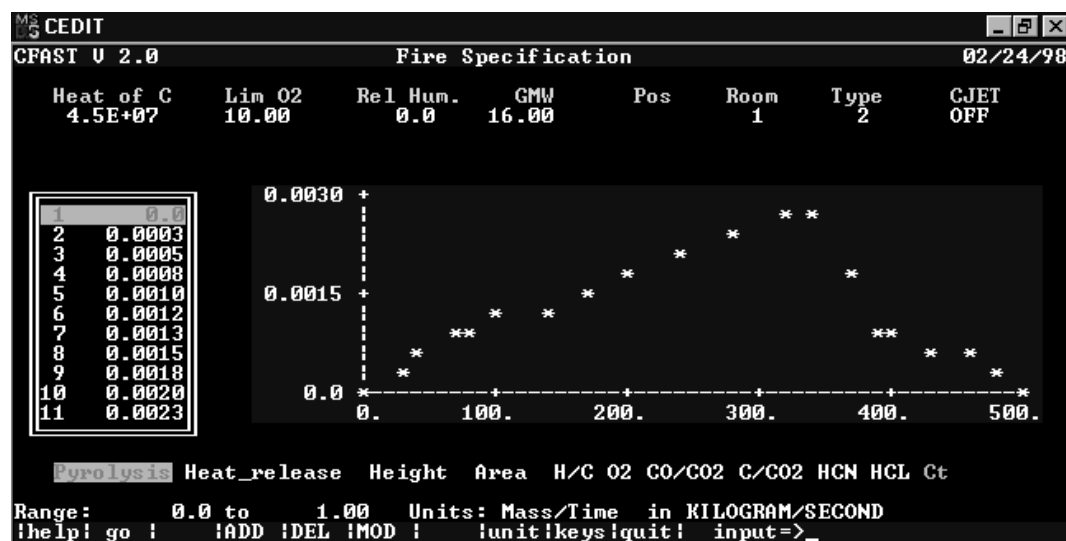
- omgivningsförhållanden
- rumsgeometrier
- öppningar, som dörrar, fönster och taköppningar
- eventuella fläktar
- termiska egenskaper för väggar, golv och tak
- brandförhållanden som effekt, pyrolyshastighet, förbränningsvärme och förhållanden mellan förbränningsprodukter.

Det enda som behandlas vidare här är "Fire Specification", d.v.s. den delsidan i CEdit som behandlar brandförhållandena. Där definieras bl.a. förbränningsvärmets för bränslet, se figur F.1.

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 på egen hand ut pyrolyshastigheten eller effektutvecklingen beroende på vad det är man har definierat. Vid simulering av försöken har främst pyrolyshastigheten valts då 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  $O_2$ -halten, mäts i kanalen utanför själva brandrummet, och då ventilationskontroll inträffar sker viss förbränning utanför detta. 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, d.v.s. då branden är bränslekontrollerad. Då pyrolyshastigheten anges som indata är det främst hur väl CFAST beräknar massflödet av luft in i rummet som kommer att påverka resultatets riktighet. Man kan observera att resultatet konstigt nog blir olikt beroende på om pyrolyshastigheten eller effektutvecklingen definieras.

Hur övriga villkor definieras i indatafilen antas vara kända för läsaren. I annat fall refereras till användarmanualen /F.1/.



Figur F.1, Skärmdump från CEdit "Fire Specification"

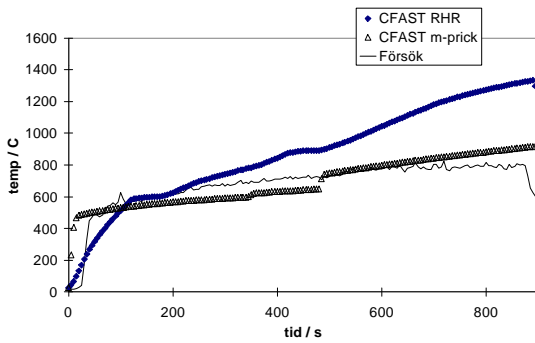
### F.2.3 Cplot

I Cplot plockar man ut de data som är intressanta för den specifika situationen. Man kan välja att direkt studera resultaten i form av diagram eller i datakolumner. Om resultaten skall presenteras i en rapport bör man transportera data till ett kalkyldiagram, t.ex. Excel. Detta ger möjlighet att presentera data på ett snyggare sätt. Exempel på parametrar som kan studeras är: effektutveckling, temperatur, brandgaslagrets höjd, massflöde, pyrolyshastighet m.m.

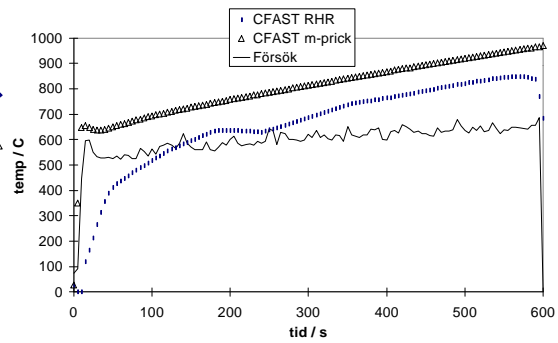
### F.3 Utvärdering av beräkningar

Syftet är som tidigare nämnts att jämföra småskaleförsöken med simuleringar i CFAST. 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 kommer fram till att i de scenarier som analyseras i rapporten, överpredikteras temperaturen i brandgaslagret med i runda tal 25-40% och att brandgaslagrets höjd underpredikteras med 10-40% /F.2/.

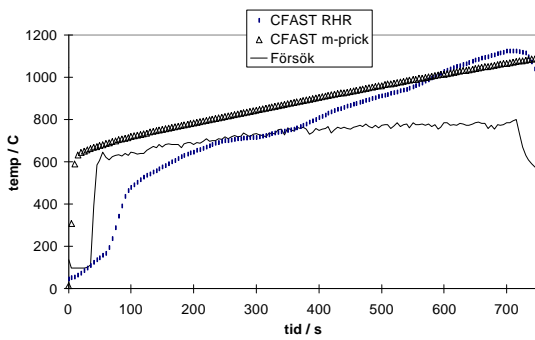
#### F.3.1 Temperatur beräknad med hjälp av CFAST jämförd med uppmätta värden från försök



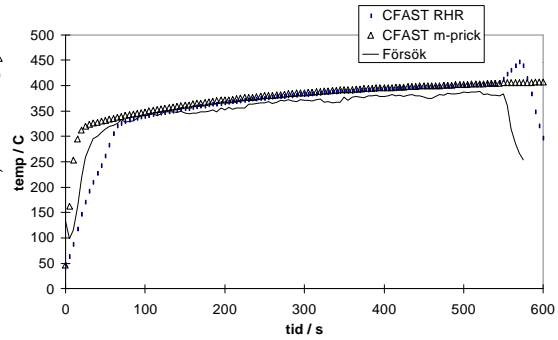
Figur F.2. Metan 1.



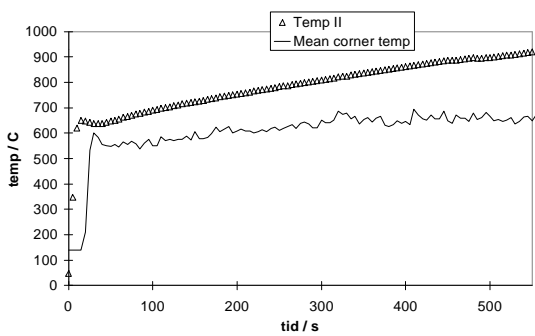
Figur F.5. Metan 4.



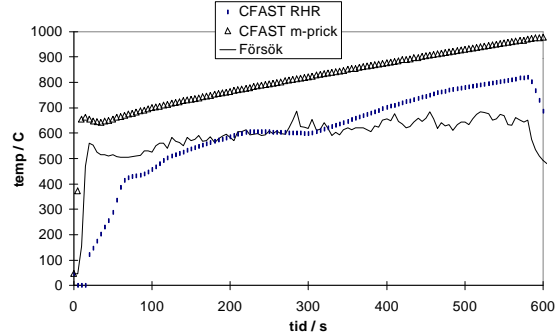
Figur F.3. Metan 2.



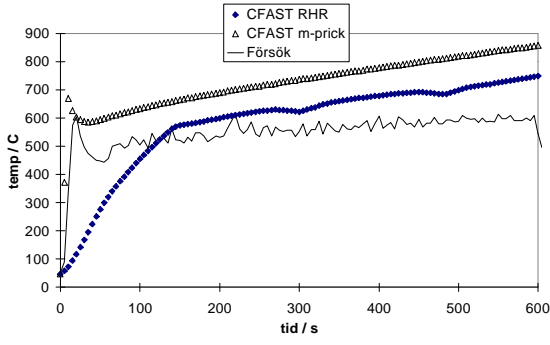
Figur F.6. Metan 5.



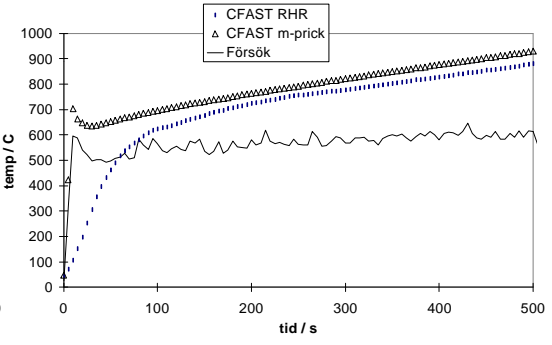
Figur F.4. Metan 3.



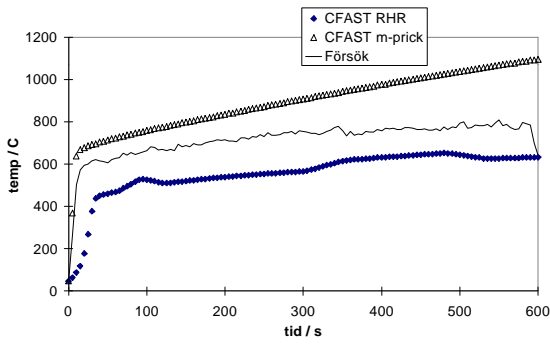
Figur F.7. Metan 6.



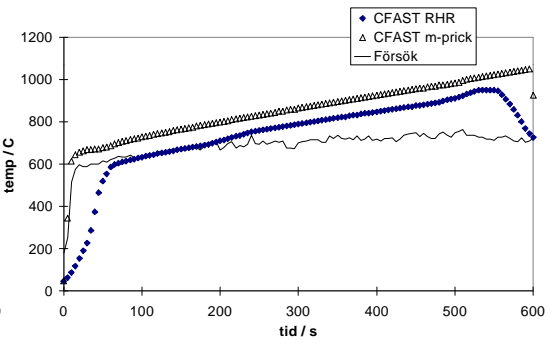
Figur F.8. Metan 7.



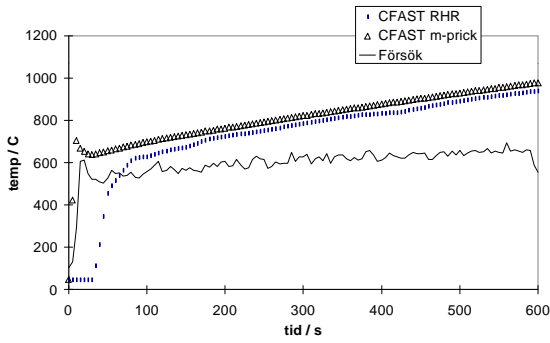
Figur F.12. Metan 11.



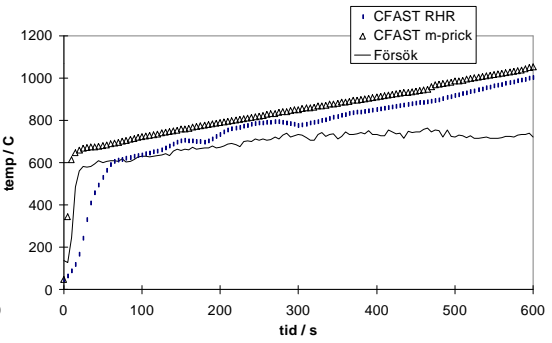
Figur F.9. Metan 8.



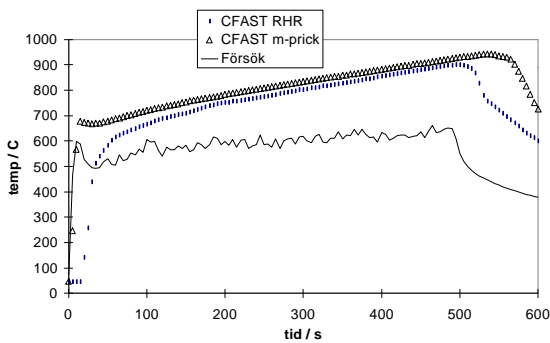
Figur F.13. Metan 12.



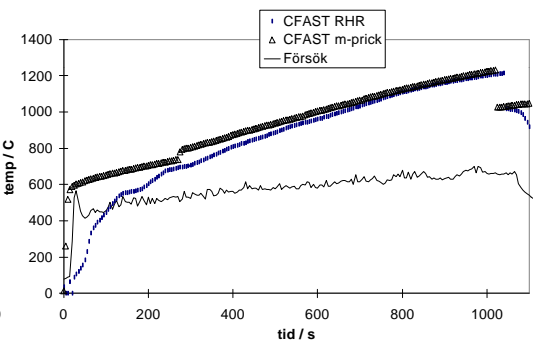
Figur F.10. Metan 9.



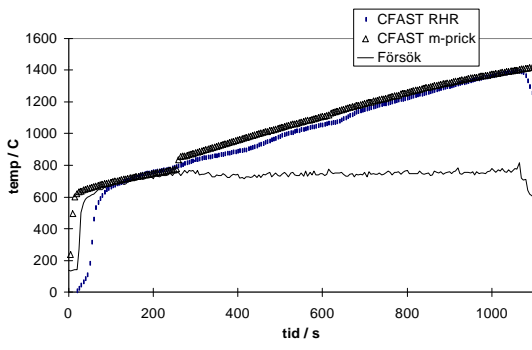
Figur F.14. Metan 13.



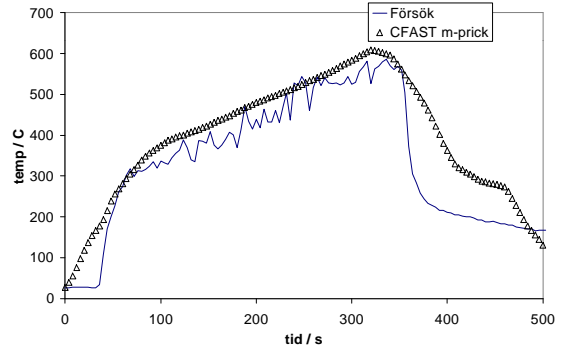
Figur F.11. Metan 10.



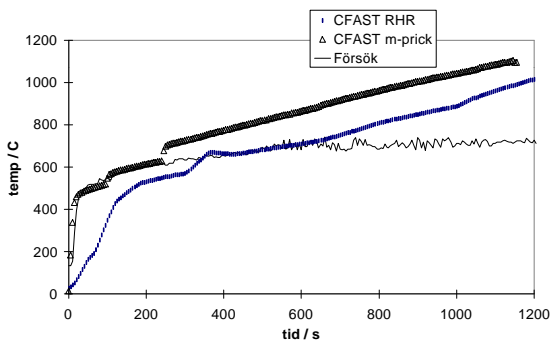
Figur F.15. Metan 14.



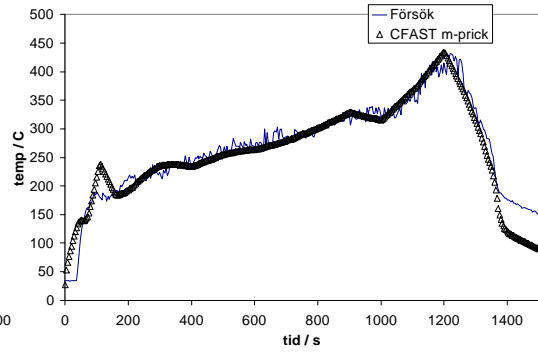
Figur F.16. Metan 15.



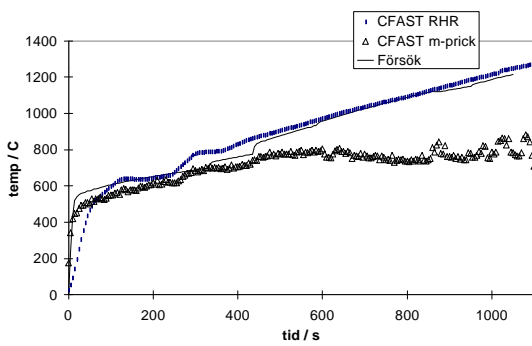
Figur F.20. Heptan 4.



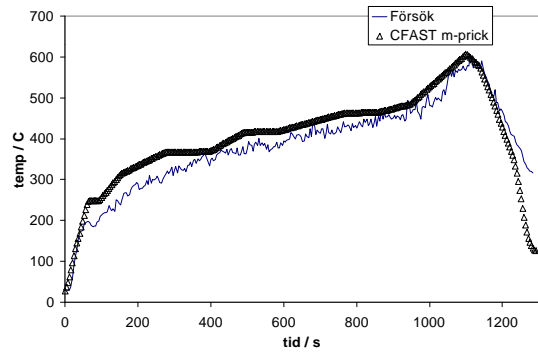
Figur F.17. Metan 16.



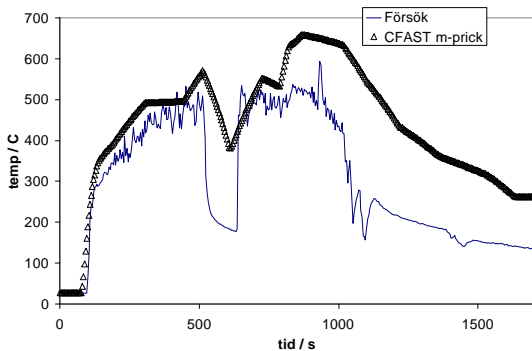
Figur F.21. Heptan 5.



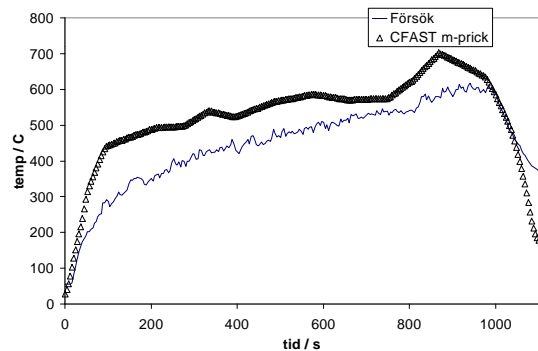
Figur F.18. Metan 17.



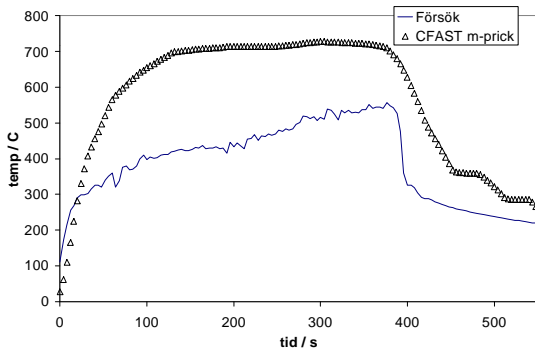
Figur F.22. Heptan 6.



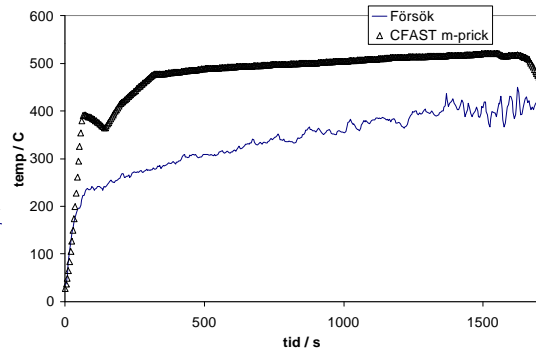
Figur F.19. Heptan 3.



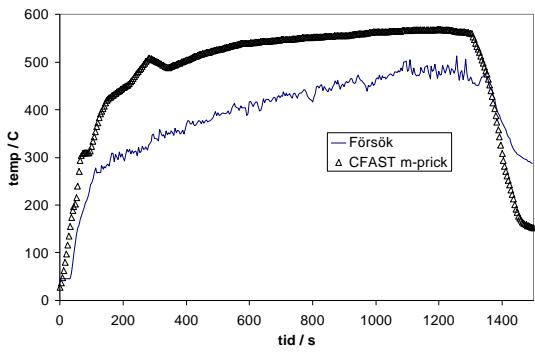
Figur F.23. Heptan 7.



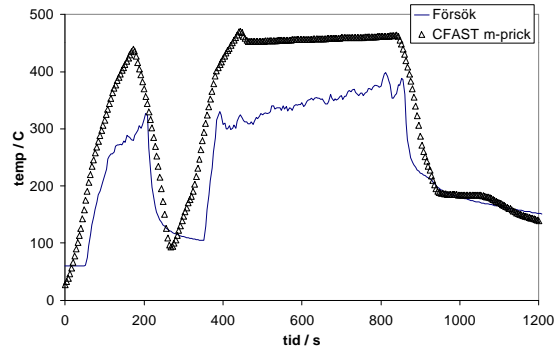
Figur F.24. Heptan 8.



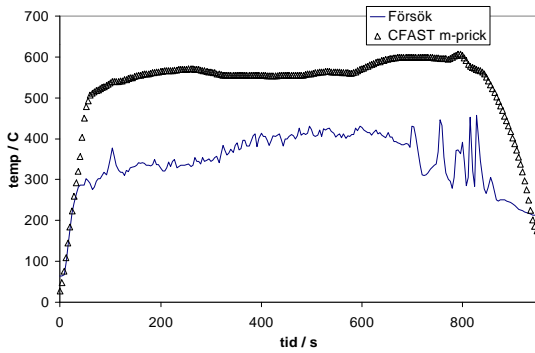
Figur F.28. Heptan 12.



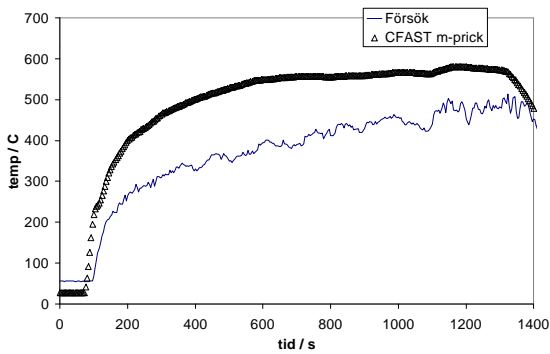
Figur F.25. Heptan 9.



Figur F.29. Heptan 13.



Figur F.26. Heptan 10.



Figur F.27. Heptan 11.

### F.3.2 Val av representativa värden

Då de båda försöksserierna tillsammans innehåller 39 försök är mängden data som skall 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 diagram för tid och temperatur redovisas istället enbart värden för en eller ett fåtal punkter per försök. Dessa valdes ut för att på ett så bra 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.

Den temperatur som räknas fram vid en simulering i CFAST är  $T_o$ . Som nämnts tidigare överpredikteras temperaturen vanligtvis av CFAST. Man kan givetvis inte säga exakt hur mycket CFAST överpredikterar temperaturen utan det är olika för olika scenarier. 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 ekvationen ger.

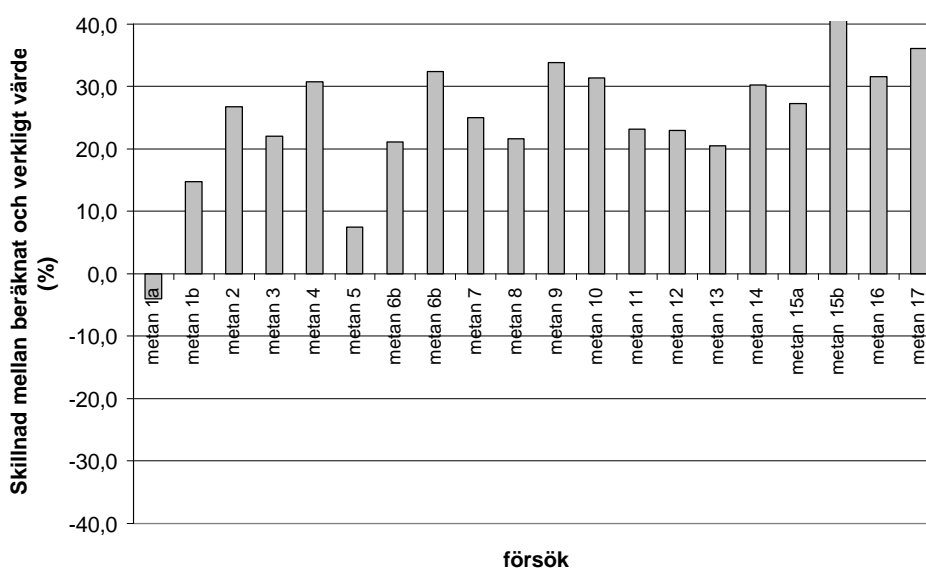
Samtliga temperaturer, såväl uppmätta som beräknade av CFAST, visas i avsnitt F.3.1. Ett sätt att få fram hur stor avvikelser är mellan den uppmätta temperaturen och den beräknade är att kontrollera förhållandena mellan dessa temperaturer. Det vill säga:

$$\frac{T_{CFAST} - T_{försök}}{T_{försök}} \quad \text{Ekvation F.1}$$

där  $T_{CFAST}$  = den av CFAST beräknade temperaturen [K]

$T_{försök}$  = den vid försöken uppmätta temperaturen [K]

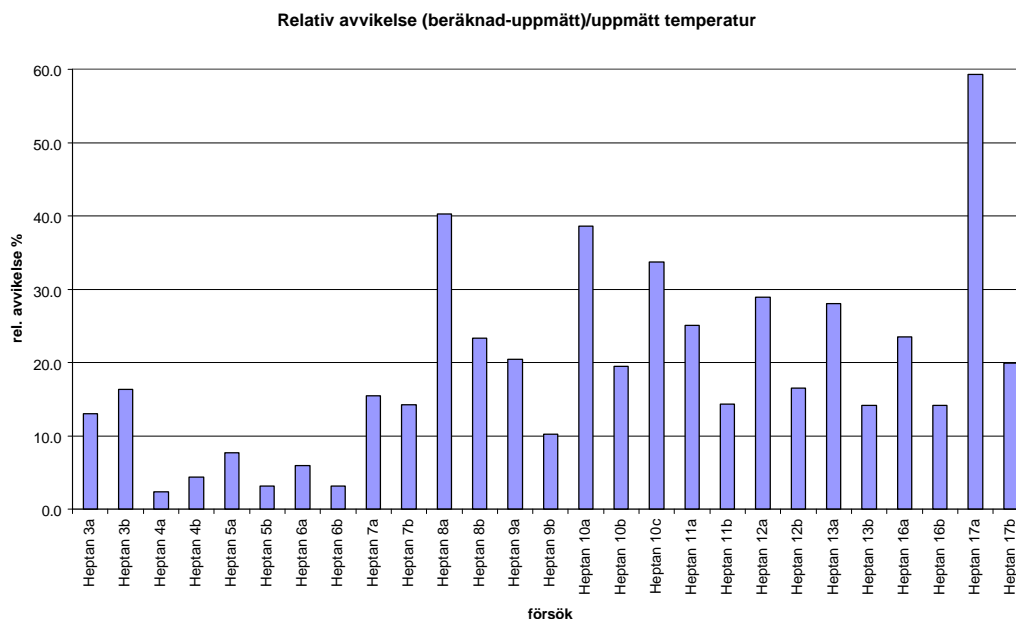
Nedan visas hur förhållandena mellan dessa temperaturer är för metanserien.



Figur F.30, Resultatet av ekvation F.1 för metanserien. Temperaturerna som ligger till grund för beräkningarna är uttryckta i K. Beteckningarna a och b i figuren motsvarar olika tidpunkter.



De värden som är redovisade 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, fränsett 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 /F.2/.



Figur F.31, Heptanförsöken, relativ avvikelse

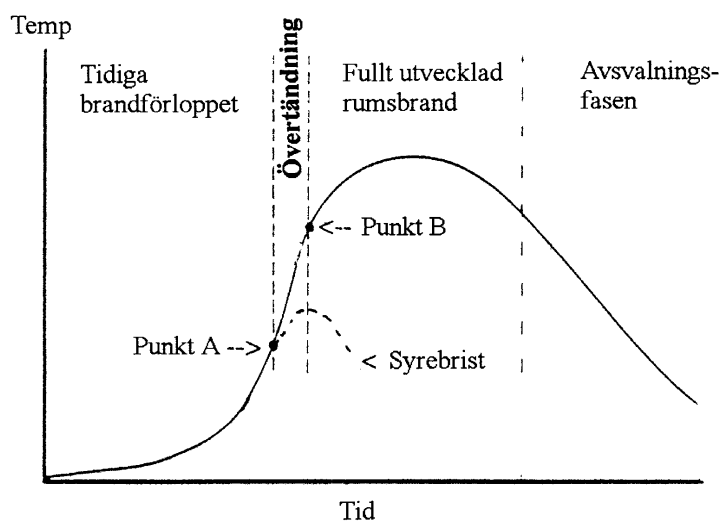
Det är viktigt att kommentera att den statistiska behandlingen inte är fullständig. Egentligen bör varje tidssteg analyseras men det viktiga är inte att undersöka om CFAST uppskattar temperaturen med t.ex. 22 eller 23% utan att kontrollera om CFAST uppskattar temperaturen någorlunda korrekt. CFAST kommer med all sannolikhet att uppskatta temperaturen olika beroende på vilket scenario som är aktuellt, men det verkar som att CFAST alltid överskattar temperaturen.

Man kan alltså konstatera att temperaturen kan uppskattas skapligt med datorprogrammet CFAST. Frågan är då om temperaturen är ett tillräckligt bra kriterium för att bedöma om en övertändning kommer att inträffa eller inte. Finns det kanske andra kriterier som är bättre?

#### ***F.4 Temperaturen som kriterium för övertändning ?***

Det är mycket svårt att bedöma när övertändning inträffar under småskal-försöken. Det finns inget extra bränsle som kan pyrolyseras och delta i processen. Övertändningen kommer därför att se annorlunda ut jämfört med en verklig rumsbrand. Övertändning är en tidsperiod och det är därför svårt att ange en exakt tidpunkt för när den verkligen inträffar enligt definitionen. Därför är det svårt att tro att två oberoende personer skulle säga att ett brandrum är övertänt vid samma tidpunkt. Det räcker med att man bedömer att rummet är övertänt t.ex. med 15

sekunders skillnad; denna tidsskillnad gör kanske att temperaturen i rummet skiljer 100°C. Temperaturgradienten i övertändningsperioden är mycket hög, se figur F.32.



Figur F.32, Temperaturgradienten under övertändningsperioden (finns också i kapitel 5).

De kriterier som används är framför allt temperaturen och strålningen till golvet. Om man sammanställer resultatet av vad ett flertal forskare har kommit fram till under åren kan man se att det skiljer en hel del på deras kriterier. Resultaten varierar inom vida gränser. För temperaturen varierar uppmätta värden mellan exempelvis 450- 771°C. Dock ligger de flesta värden i regionen 600-700°C.

För strålningen varierar värdena från 15 kW/m<sup>2</sup> till 33 kW/m<sup>2</sup>. De flesta värden ligger dock över 20 kW/m<sup>2</sup>. Att dessa värden skiljer sig åt beror givetvis också på att försöken utförts med olika bränslen och konfigurationer. Det beror givetvis också på ovanstående diskussion, nämligen att forskare kanske inte visuellt uppfattar att övertändning inträffar vid samma tidpunkt.

Man kan dock generalisera och säga att när temperaturen är över 600°C i brandgaslagret anser de flesta att övertändning har inträffat. Likaledes anser de flesta att en strålningsnivå på mer än 20 kW/m<sup>2</sup> är tillräcklig för att orsaka övertändning i ett rum.

Handberäkningsmodeller uppskattar i många fall också sannolikheten för övertändning på ett bra sätt. MQH-metoden kommer att diskuteras i appendix H. Handberäkningsmodeller har dock begränsningar eftersom de ofta är framtagna med hjälp av fullskalförsök med speciell konfiguration. Speciellt väggfunktioner är känsliga för olika konfigurationer och material.

Mot bakgrund av detta kan man konstatera att CFAST på ett ingenjörsmässigt sätt kan användas för att uppskatta sannolikheten för övertändning där kriteriet är framräknad temperatur. Man måste dock ha klart för sig att det finns en stor

osäkerhet i de simuleringsresultat som programmet ger och det är viktigt att man inte använder programmet utanför dess användningsområde.

Används programmet felaktigt, t.ex. i en situation där en tvåzonsmodell inte är tillämpbar, kommer resultatet att vara oanvändbart. I en sådan situation måste en s.k. fältmodell användas. Fältmodeller simulerar tiden fram till övertändningen på ett bättre sätt men de simulerar inte själva övertändningsprocessen. Eftersom de kvantitativa måtten på tiden då övertändning kan anses inträffa ( $450^{\circ}\text{C} < T_g < 770^{\circ}\text{C}$ ) ligger inom ett stort intervall, kan inte CFD-modeller anses ge betydligt bättre uppskattning av när övertändning inträffar.

Fältmodeller är alltså värdefulla i situationer då temperaturen är t.ex.  $200^{\circ}\text{C}$  och man vill beräkna hur lång tid det tar för en rökdetektor att utlösa. Fältmodeller kommer att diskuteras i appendix G.

### ***F.5 Referenser***

/F.1/ 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

/F.2/ Lundin, J., Uncertainty in smoke transport models, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997

## Appendix G: Beräkningsmetod - SOFIE

### G.1 Inledning

Användningen av fältmodeller för att simulera bränder har fått en ökad betydelse när det gäller att värdera konsekvenserna av en eventuell brand och utreda orsakerna till inträffade brandförlopp. Allteftersom modellerna blir mer pålitliga och tillgången till datakraft ökar kan också mer komplexa tillämpningar behandlas. Mer komplexa simuleringar kräver dock både förbättrade fysikaliska modeller och en omsorgsfull validering av modellerna. En beräkningsmodell, fritt distribuerad bland brandmodellerare, ger möjlighet till utveckling av en beräkningskod till gagn för alla som arbetar med brandforskning.

Det är mot denna bakgrund SOFIE har utvecklats under ledning av ett konsortium bestående av ett antal europeiska brandlaboratorier och universitet: FRS, HSE, Cranfield University och Home Office från England, SP i Borås och Lunds universitet från Sverige, VTT från Finland och CSTB från Frankrike. Brandforsk har stött SP och LTH med medel.

Utvecklingen av SOFIE har tre huvudmål:

- att utveckla en speciell fältmodell för att förutsäga bränder i byggnader, som innefattar huvuddragen av existerande kommersiella allmängiltiga CFD- koder.
- att förutsäga mer komplexa brandfenomen som vanligen inte är tillgängliga i kommersiella koder, exempelvis brandtillväxt och brandspridning, toxiska emissioner och brandgas samt representativa materialegenskaper.
- att göra koden tillgänglig för det brandtekniska forskningssamfundet som en robust fältmodell som kan användas för brandriskbedömningar, för jämförelse med andra beräkningsprogram och för vidare utveckling.

Fältmodeller är baserade på en fullständig, tidsberoende och tredimensionell lösning av grundläggande konserveringslagar. I motsats till s.k. tvåzonsmodeller är det inte nödvändigt att i fältmodeller introducera empiriska antaganden om luftinträngning i brandplymen, oändligt snabb temperaturutjämning i övre gaslagret etc. Fältmodeller beräknar istället inträngning, flödes hastighet, temperatur, bränsle- och sotkoncentration etc i ett antal kontrollvolymner genom att hålla reda på in- och utgående flöden av massa m.m. i kontrollvolymen. Med dagens datorer är det fullt realistiskt att dela in ett rum i upp till flera tusen kontrollvolymner. Man löser de lokala konserveringslagarna för bevaring av massa, rörelsemängd, energi och kemiska ämnen. Fältmodellerna innehåller olika delmodeller för turbulens, strålning, konvektion, förbränning, flamspridning, pyrolys m.m. Dessa kommer att diskuteras vidare i avsnitt G.2.

Det finns många olika nivåer av sofistisering i brandmodellering. Den enklaste modellen, zonmodellen, är mest önskvärd om antagandena i modellen är giltiga för den aktuella tillämpningen. Zonmodellen är i huvudsak utvecklad för att i enkla brandscenarier i mindre rum ge ett grovt mått på brandgaslagrets läge, information som är mycket betydelsefull för att bedöma möjligheten att utrymma lokalen. I större rum med komplexa geometrier och som har sneda tak, takbalkar, porösa undertak, sprinkler m.m. bör zonmodeller användas med stor försiktighet då många modellantaganden inte är giltiga.

Fältmodeller kräver å sin sida större datorkapacitet än zonmodeller men ger istället en mycket mer detaljerad bild av brandförloppet. Eftersom fältmodellerna dessutom bygger på grundläggande fysikaliska principer kan man bygga vidare och inkludera t.ex. brandgasspridning, släckverkan med sprinkler, produktion av toxiska ämnen m.m. Att bygga vidare på zonmodellerna medför stora svårigheter då dessa i sig inte ger detaljerad information om t.ex. infallande värmefflöde mot en yta som behövs för en flamspridningsmodell och uppehållstider, temperatur och gaskoncentration som behövs för en modell för produktion av toxiska gaser.

Fältmodeller har tidigare betraktats som relativt dyra och i kostnad jämförbara med byggnadsteknisk strukturanalys. Kostnaderna har dock minskat avsevärt och förväntas minska ytterligare i takt med utveckling av mjukvara och hårdvara. På grund av kostnadsaspekten används fältmodeller idag oftast för större komplicerade objekt som atrier, mycket stora byggnader med avancerad struktur, tunnlar, offshore- anläggningar eller vid större brandorsaksutredningar.

Detta var en kort beskrivning om skillnader mellan fältmodeller och zonmodeller. Nedan skall småskaleförsöken som beskrivits i appendix B simuleras med fältmodellen SOFIE, speciellt skall ett försök till bedömning göras huruvida en fältmodell ger oss möjlighet att avgöra om ett rum kommer att bli övertänt eller inte. Ställning skall också tas till om fältmodeller är mycket bättre för detta ändamål.

## ***G.2 Beskrivning av SOFIE***

### **G.2.1 Indata**

Första steget är att skapa en s.k. "grid". Detta innebär att rummet delas in i ett antal kontrollvolymmer. Hur många kontrollvolymmer som skall användas är upp till användaren och beror till stor del på den specifika situationen och på vilken noggrannhet som skall erhållas. Det kan t.ex. vara nödvändigt att ha en tätare cellstruktur nära väggar, hörn eller där branden är placerad. Griden kan alltså göras olika tät i domänen som skall simuleras. SOFIE använder ett högerorienterat x-, y-, z- system. Ju fler celler som används desto längre blir simuleringstiden; antalet celler måste därför noga avvägas.

Andra steget innebär att man bestämmer vilka blockader som skall finnas i griden. En blockad representerar t.ex. en vägg eller ett golv. Efter att vissa celler definierats som blockader, används inte dessa i flödesberäkningarna.

Blockaderna definieras på två olika sätt: aktiva eller inaktiva. Om de specificeras som aktiva deltar de i energibalansen i rummet, dvs de leder värme. Om blockaderna specificeras som inaktiva leds ingen värme genom dem. Om man specificerar blockaden som aktiv måste man välja vilket material denna antas bestå av. Detta görs från en befintlig materialfil som innehåller de vanligaste materialen, men det finns också möjlighet att lägga till egna material. Materialen kan väljas olika för t.ex. golv och tak. Varje blockad måste var minst två celler tjock för att värmeledning genom den skall kunna beräknas. Den bör helst vara fem celler tjock.

Därefter skall s.k. randvillkor väljas. Detta innebär att man specificerar vilken funktion som skall gälla på utsidan av vissa celler; man tilldelar cellens utsida en viss egenskap. Detta skall ske på de platser där cellerna ändrar typ, t.ex. mellan en flödescell och en aktiv cell eller mellan en aktiv och en inaktiv cell. Man talar om flödes- randvillkor och termiska randvillkor, varav den förra kan vara:

- inflöde, väljs när ett känt flödet strömmar in i domänen.
- utflöde, väljs när ett känt flöde strömmar ut ur domänen.
- statiskt tryck, väljs när användaren vill applicera ett konstant statiskt tryck. Detta används ofta utanför själva brandrummet. För att en bra lösning skall kunna erhållas krävs ett stort antal celler också utanför brandrummet.

När SOFIE beräknar värmefflöde, används termiska randvillkor som kan vara bl.a.:

- adiabatiska; används när värmeledning är förbjuden. Detta används automatiskt när celler är specificerade som inaktiva.
- Isotermiskt; används när gränsskiktet skall hållas vid en jämn temperatur.
- Htcoef; används när användaren vill specificera ett värmeövergångstal.
- Conjugate; är standardval på ytor mellan flödesceller och aktiva celler och som innebär att SOFIE själv beräknar det aktuella värmeövergångstalet vid olika tidpunkter.

Det finns många flera att välja mellan men för mer information hänvisas till SOFIEs manual /G.1/.

Efter att ha bestämt hur cellstrukturen skall se ut, var man skall placera väggar och andra omslutande konstruktioner samt specificerat gränsskikten skall lösningstypen bestämmas. Denna beror på vilket fysiskt problem som skall simuleras. Om utgångspunkten är en rumsbrand kan man börja med att välja om problemet skall lösas stationärt eller transient. Det bör poängteras att en transient lösning är mycket tidskrävande.

Efter detta specificeras om brandkällan skall simuleras endast som en värmekälla eller om en förbränningsmodell skall användas. Det finns ett antal förbränningsmodeller att välja på, bl.a. :

- simple eddy breakup
- adiabatic flamelet
- non adiabatic flamelet

Därefter väljs en laminär eller turbulent lösning. Vid alla rumsbränder väljs en turbulent lösning. Den turbulensmodell som används i SOFIE är oftast den s.k. ”k- $\epsilon$  turbulence model with bouyancy modifications”. Om en förbränningsmodell har valts kommer automatiskt turbulensmodellen med.

För närvarande kan endast några få typer av bränsle simuleras, t.ex. metan och PMMA. Detta är dock under utveckling.

När rumsbränder simuleras måste ”bouyancy” inkluderas.

I SOFIE finns också en flamspridningsmodell. Den är för närvarande under utveckling och skall användas med försiktighet. Hittills har den endast används för enkla material som PMMA.

I SOFIE finns också ett antal sotmodeller men även dessa är fortfarande under utveckling och skall därför användas med försiktighet.

Vad gäller strålningsmodeller finns en mängd olika alternativ. När strålningsmodeller används bör antalet strålar begränsas för att simuleringstiden inte skall bli oändligt lång.

### **G.2.2 Simulering**

Efter det att indatafilen konstruerats sparas den på ett lämpligt ställe på hårddisken. Därefter läses filen in och sedan kan simuleringen påbörjas. Det är viktigt att vissa s.k. ”under relaxation parameters” står inställda på ett speciellt sätt för att man snabbt skall få en konvergerande lösning. Dessa parametrar avgör hur stora språng lösningsmodellen gör när lösningen itereras fram. Parametrarna måste också ändras under simuleringens gång. I många fall kan detta ställa till problem och är något som användaren lär sig med tiden. Antalet iterationer bestäms av användaren.

### **G.2.3 Utdata**

Utdata kan studeras på två sätt, dels direkt i programmet genom att man studerar en ”profil”, dels genom att resultatet transporteras till ett grafikprogram, t.ex. Fieldview. I Fieldview kan man göra mycket färgglada och noggranna bilder av brandförloppet. Tyvärr tar detta lång tid och om det hade varit möjligt att utvärdera resultaten snabbare hade den totala arbetstiden minskat avsevärt. Som utdata erhålls en mängd information som temperatur, brandgaslagrets höjd, koncentrationen av olika ämnen, energibalansen i rummet, m.m. Man kan också beräkna t.ex. hur mycket strålning som infaller mot en viss punkt. Utdata beror delvis på vilken lösningsmodell som valts. Om exempelvis brandkällan simuleras som en värmekälla kan inte de olika förbränningsprodukterna beräknas.

## **G.3 Beräkningar**

### **G.3.1 Försöksbeskrivning**

Det försök som har simulerats är metanförsök nr 9. För en allmän beskrivning av försökuppställningen hänvisas till appendix B. Öppningen i detta försök är 0.085 m bred och 0.42 m hög. Proben var placerad centralt i rummet ca 15 cm från taket och 20 cm från väggen. Från mätningen med proben erhålls koncentrationerna av O<sub>2</sub>, CO och CO<sub>2</sub>. Gasflödet var 1.3 g/s (metan).

### **G.3.2 Indata**

Indatafilen ges i fullständig version sist i detta appendix. Simuleringen är utförd med både förbränningsmodell och strålningsmodell. Som väggmaterial har betong valts. Värdena har modifierats för att motsvara det material som finns i försökuppställningen. Bränslet simuleras som ett inkommande gasflöde av metan. Förbränningsmodellen ”simple eddy breakup” används. Bränslets hastigheten motsvarar den i försöket. För att erhålla en bra lösning användes ungefär 55000 celler i simuleringen.

### **G.3.3 Simulerings förutsättningar**

Inställningar av typen ”Under relaxation parameters” har gjorts enligt indatafilen. Dessa har justerats under simuleringens gång. Simuleringstiden uppgick till ungefär 80 timmar.

### **G.3.4 Utdata**

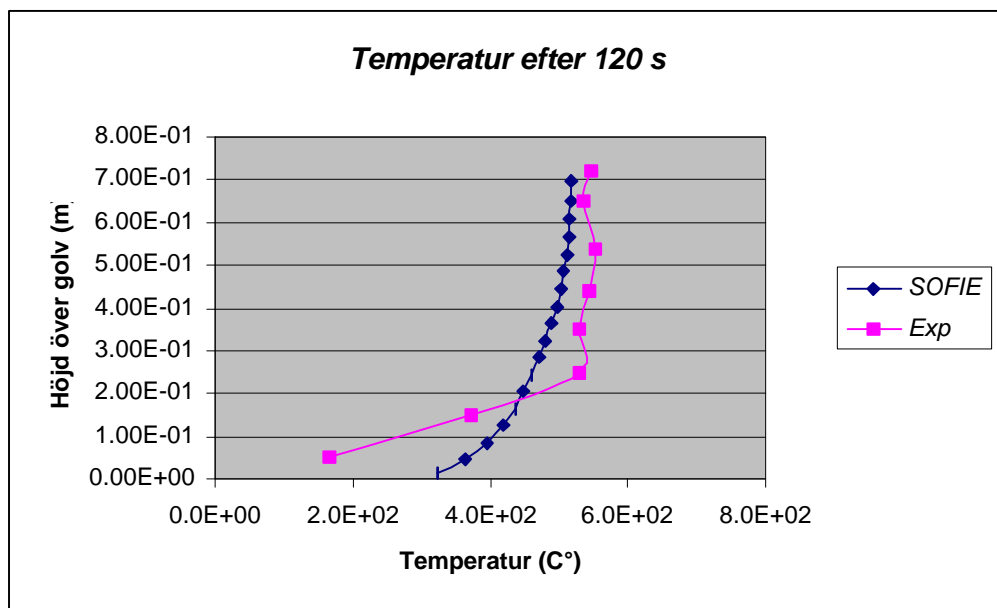
De parametrar som jämförs är temperaturen på olika platser i rummet och koncentrationerna av O<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub>. Temperaturen mättes med hjälp av åtta termoelement som placerades nära ett hörn i framkant av rummet. För exakt beskrivning, se appendix B. Den simulerade temperaturen jämförs med den uppmätta.

Proben var placerad enligt avsnitt G.3.1. Då det är svårt att exakt ange probens placering under försöken måste jämförelsen betraktas med viss försiktighet.



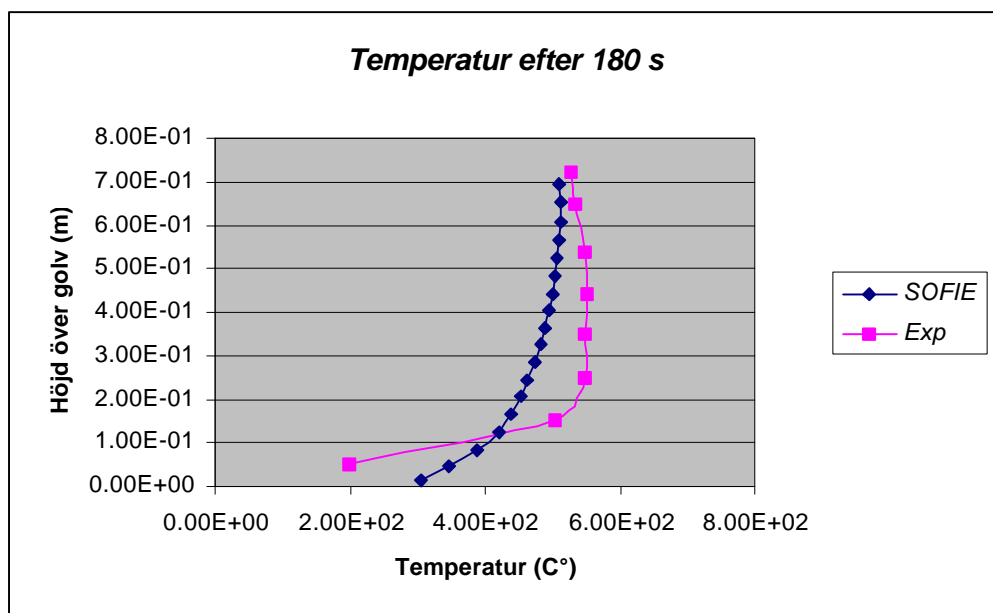
### G.3.5 Jämförelse beräknade data/uppmätta data

De parametrar som jämförs är gastemperaturen, koncentrationen av koldioxid och koncentrationen av syrgas. SOFIE ger ett stort antal parametrar men alla jämförs inte här.



Figur G.1, Temperaturen på olika höjder i brandrummet efter 120 sekunder

Figur G.1 visar att SOFIE uppskattar temperaturen på ett skapligt sätt. Långt ner i rummet är dock avvikelsen stor. Det är svårt att exakt avgöra vad det beror på. En bidragande faktor kan vara osäkerheter i mätdata. Exempel på felkälla är att termoelementen påverkas av strålning från flammorna.



Figur G.2, Temperaturen på olika höjder i brandrummet efter 180 sekunder

Figur G.2 visar att SOFIE uppskattar temperaturen på ett hyfsat sätt. Lägga märke till utseendet på den experimentella kurvan. Temperaturen är lägre uppe vid taket

än längre ner i rummet. Detta beror på att flammorna endast existerar på undersidan av brandgaslagret eftersom syrgashalten under taket inte medför förbränning. Ju högre ekvivalenskvot desto mindre syre finns tillgängligt för förbränning strax under taket.

Nedan jämförs koncentrationerna av syre och koldioxid från försöken med de simulerade resultaten. Observera att jämförelsen endast sker i en punkt.

*Tabell G.1, Koncentrationen av koldioxid vid probens position i brandrummet*

Tid (s)	SOFIE	Experiment
120	8.5	7.5
180	8.5	9.0

Tabellen visar att SOFIE uppskattar koncentrationen av koldioxid på ett bra sätt.

*Tabell G.2, Koncentrationen av syre vid probens position i brandrummet*

Tid (s)	SOFIE	Experiment
60	2.0	2.5
120	0.0	0.0

Tabellen visar att SOFIE uppskattat koncentrationen av syrgas på ett bra sätt. Redan efter 120 sekunder är syrgashalten i rummet nära 0 %. Detta beror på att ekvivalenskvoten är mycket hög, dvs rummet blir tidigt kraftigt underventilerat.

Sammanfattningsvis kan sägas att simuleringen i detta fall har fungerat tillfredsställande. Resultaten är inte på något sätt exakta men måste anses ligga inom ramen för vad som anses godkänt. Resultaten här ger dock ingen fingervisning om hur mycket tid som har gått åt för att erhålla dessa resultat.

*Fältmodeller ger mer noggranna resultat än zonmodeller men simuleringstiderna är avsevärt längre. Man bör därför noga avväga nödvändigheten av att använda fältmodeller. I vissa situationer är dock fältmodeller en nödvändighet.*

#### **G.4 Kan fältmodeller användas till att uppskatta risken för övertändning?**

Det är uppenbart att fältmodeller ger en mer detaljerad bild av brandförloppet än t.ex. zonmodeller. Hur kan vi med hjälp av SOFIE uppskatta om ett rum blir övertänt? För att kontrollera om ett rum blir övertänt måste man studera temperaturen, syrehalten och bränsleförbrukningen. Dessa tre parametrar behövs för att avgöra om flammor kommer att uppstå. Att enbart använda temperaturen kan vara riskabelt.

När det gäller att beskriva övertändning kvarstår ett problem; det finns fortfarande inget riktigt bra kriterium som säger att ”nu är rummet övertänt”. Det är därför inte säkert att en fältmodell ger en mycket bättre uppskattning av tidpunkten för en övertändning. Fältmodellen simulerar fram till övertändning på ett bättre sätt än en zonmodell men själva övertändningsperioden är svår att simulera.

### ***G.5 Problem med SOFIE***

- Programmet har inte testats i så stor utsträckning mot ventilationskontrollerade bränder; SOFIE fungerar bäst för bränslekontrollerade bränder.
- Pyrolysmodeller och flamspridningsmodeller är fortfarande under utveckling.
- Turbulensmodeller styr till stor del temperaturprofilen i simuleringen. SOFIE innehåller en mindre bra turbulensmodell; denna är dock under utveckling.
- Att skapa indata är relativt omständligt. En grafisk s.k. pre-processor är dock under utveckling.
- Det är också relativt omständligt att skapa utdata eftersom resultatet i många fall måste transporteras till andra program.
- Troligtvis beror en del av konvergeringsproblemet i SOFIE på att de numeriska lösningsmodellerna inte fungerar tillfredsställande.
- ”Under relaxation parameters” måste ändras under simuleringens gång. Om inte detta görs kommer simuleringstiden att bli avsevärt längre. I värsta fall kommer inte simuleringen att konvergera överhuvudtaget.

### ***G.6 Viktigt att beakta när fältmodeller används i simuleringar***

- Det är mycket viktigt att beakta vilka data som är av intresse innan man avgör om det är meningsfullt att använda fältmodeller. I många fall kan zonmodeller användas.
- Användaren måste ha en god kunskap om de modeller som ingår i koden för att kunna göra en riktig bedömning av resultaten som erhålls.
- SOFIE är under utveckling. Troligtvis kommer det att ta några år innan konsulter kan använda programmet och det kommer att krävas flera månaders inlärningsstid.
- Simuleringar kan i vissa fall ta flera veckor att utföra.
- För att kunna utföra simuleringar krävs att man arbetar minst halvtid med att simulera.

### ***G.7 Referenser***

/G.1/ Welch, S., SOFIE, User Guide, Cranfield University, England 1996

## Appendix H: Beräkningsmetod - MQH- metoden

### H.1 Inledning

Det finns ett antal handberäkningsmodeller som kan användas för att bedöma om övertändning kan uppstå i en byggnad. I detta avsnitt används den s.k. MQH-metoden. Som kriterium för om övertändning uppstår används att temperaturen i brandgaslagret skall nå 600°C. Huruvida detta är korrekt har diskuterats utförligt i appendix F. MQH-metoden kommer att verifieras med hjälp av försök som utförts i småskala. Dessa finns redovisade i appendix B. MQH-metoden finns också delvis beskriven i avsnitt 5.2.1. I denna rapport kommer alltså inte metoden att utvärderas med hjälp av fullskaleförsök.

### H.2 Beskrivning

Metoden bygger på energibalansen i ett rum. Rummet är uppdelat i en övre varm zon och en nedre kall zon. Temperaturen antas vara samma inom en zon. Rummet antas vara välventilerat. Energibalansen är förenklad och säger att den energi som utvecklas i rummet försvinner ut genom öppningen genom konvektion eller leds in i väggarna genom värmeledning. Ingen energi anses alltså stråla ut genom öppningen eller lagras i gasmassan. Detta är givetvis en förenkling. Energibalansen kan då skrivas enligt ekvation H.1.

$$Q = m_g C_p (T_g - T_a) + q_{loss} \quad \text{Ekvation H.1}$$

Denna kan skrivas om till ett uttryck för temperaturen:

$$\Delta T = \frac{Q}{(m_g C_p + h_k A_T)} \quad \text{Ekvation H.2}$$

Denna ekvation kan inte lösas direkt eftersom man inte vet inte var neutrallagret ligger. Neutrallagrets höjd måste vara känd för att man skall kunna bestämma hur mycket energi som leds in i väggarna. För att lösa detta problem införde Quintiere et al /H.1/ dimensionslösa variabler. För att kunna bestämma konstanterna användes resultat från ca 100 olika experiment. Bränslet som användes i försöken var gas, trä och plast. Försöken utfördes i varierande skala, från fullskala till ca åttodelsskala. Fönster och dörrar i varierande storlek användes som öppningar. Materialet i väggar och tak hade mycket varierande egenskaper. Detta ledde fram till ekvationen H.3:

$$\Delta T = 6.85 \left( \frac{Q^2}{A_0 \sqrt{H_0} h_k A_T} \right)^{1/3} \quad \text{Ekvation H.3}$$

där - 6.85 är en konstant

- $Q$  är effektutvecklingen i rummet (kW)
- $A_0$  är öppningsarean i rummet ( $m^2$ )
- $H_0$  är höjden på öppningen (m)
- $h_k$  är värmeövergångstalet ( $kW/K m^2$ )
- $A_T$  är den inre omslutningsarean, utom öppningsarean ( $m^2$ )

Värmeövergångstalet kan beräknas med hjälp av följande ekvationer:

$$1. \quad h_k = \sqrt{\frac{kr c}{t}} \quad \text{Ekvation H.4}$$

$$2. \quad h_k = \frac{k}{d} \quad \text{Ekvation H.5}$$

där -  $k$  är värmeledningstalet (W/mK)

- $r$  är densiteten ( $kg/m^3$ )
- $c$  är värmekapaciteten (J/kgK)
- $d$  är tjockleken på väggen (m)

Vilken som används beror på för vilken tidpunkt man vill beräkna temperaturen. Tidpunkten jämförs med  $t_p$ . Denna beräknas med följande ekvation:

$$t_p = \frac{d^2}{4a} \quad \text{Ekvation H.6}$$

där -  $d$  är tjockleken på väggen (m)

- $a$  är värmediffusiviteten ( $m^2/s$ )

Om  $t$  är mindre än  $t_p$  används det första uttrycket (H.4). Om  $t$  är större än  $t_p$  är problemet stationärt och uttryck 2 kan användas (H.5).

Det är viktigt att komma ihåg att ekvationen har en rad begränsningar:

- Ekvationen gäller endast för temperaturer mellan 20 och 700°C.
- Den gäller endast för bränder som är belägna i mitten av rummet. Om branden placeras vid väggarna eller i hörnen måste konstanterna i ekvationen ändras.
- Modellen förutsätter att energin strömmar ut genom öppningen. I de fall då det tar lång tid innan gasmassan strömmar ut genom öppningen gäller inte ekvationen. Detta kan inträffa i större lokaler.
- Branden antas vara bränslekontrollerad. Då den blir ventilationskontrollerad kommer en del av energin att förbrännas utanför öppningen. Man måste i så fall uppskatta hur stor del av energin som förbränns inne i rummet för att ekvationen skall ge ett tillfredsställande resultat.

- Om bränslet är placerat på väggarna och taket kommer koefficienterna i ekvationen att ändras.
- I de fall då tvåzonsmodellen inte är giltig kan ekvationen inte användas. Detta kan bl.a. inträffa i större lokaler om branden är förhållandevis liten.

### H.3 Beräkningar

Nedan utförs beräkningar med MQH -metoden för ett antal olika metanförsök. Metanförsöken har beskrivits utförligt i appendix B. I dessa försök var brandeffekten i princip konstant. Beräkningarna utförs och resultatet jämförs med uppmätta data från försöken samt beräknade värden från CFAST-simuleringarna, utförda i appendix F. Brandeffekten beräknas med hjälp av det uppmätta massflödet.  $A_T$  är hela den totala inre omslutningsarean. Vid en första anblick kan man tro att  $A_T$  borde vara den area som omsluts av brandgaslagret; detta kompenseras dock av koefficienten i ekvationen. Öppningarna i rummet innefattas dock inte av den inre omslutningsarean.

Omslutningsmaterialet i rummet är mineralull. kpc för mineralull väljs till 20000. Väggarna, taket och golvet antas vara ca 0.05 meter tjocka.  $\alpha$  för mineralull är lika med  $8.6e-8$ .

Första steget är att kontrollera vilken ekvation som skall användas för att beräkna värmeövergångstalet. Enligt ekvation H.6 blir:

$$t_p = \frac{0.05^2}{8.6e-8 \times 4} = 7267 \text{ sek}$$

Först kontrolleras temperaturen efter 5min (300 sek) vilket innebär att ekvation H.4 skall användas i beräkningarna.

Ekvationerna H.4 och H.3 används för att beräkna temperaturen. Även om rummet är litet gäller alltså ekvationen; den är ju framtagen för rum av samma storlek. Resultaten presenteras i tabell H.1. Uppmätt temperatur i tabellen är genomsnittstemperaturen som använts tidigare i rapporten.

Rummet har måtten,  $0.7 * 1.10 * 0.75$  (l\*b\*h).  $A_T$  beräknas då enligt :

$2*0.7*1.10 + 2*0.7*0.75 + 2*1.10*0.75 - A_0 = 4.24 - A_0$ , där  $A_0$  är öppningens area.

Värmeövergångstalet beräknas efter 300 sekunder:

$$h_k = \sqrt{\frac{krc}{t}} = \sqrt{\frac{20000}{300}} = 0.008 \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Tabell H.1 visar brandgastemperaturen vid beräkningar utförda med MQH-metoden och CFAST. Dessa jämförs med uppmätta.

Observera att alla värden i den sista kolumnen är uppmätta värden. Dessa värden får inte anses vara några exakta värden. Det är inte egentligen inte meningsfullt att ange några exakta värden eftersom det finns en rad felkällor i samband med mätningar. Även de beräknade värdena enligt MQH-metoden kan varieras beroende på vilken effekt som används och vilket material som väljs som väggmaterial. Den första kolumnen i tabellen anger vilket försök som har studerats i metanserien.

Tabell, H.1, 300 sekunder

Nr	Q	A <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	h <sub>k</sub>	A <sub>T</sub>	ΔT	T <sub>MQH</sub>	T <sub>CFAST</sub>	T <sub>uppm</sub>
2	40	0.05	0.5	0.008	4.19	750	770	750	650
4	35	0.04	0.4	0.008	4.2	770	790	700	600
7	30	0.03	0.35	0.008	4.21	780	800	800	650
9	30	0.035	0.42	0.008	4.20	724	744	770	600
14	30	0.062	0.25	0.008	4.18	651	671	700	550

Kommentar: Brandeffekten i försöken har reducerats p.g.a. att en del av förbränning sker utanför rummet. Detta observerades visuellt under försöken. Andra osäkerheter är t.ex. att den uppmätta temperaturen kan vara osäker då termoelementen påverkas av strålning från branden under försöken. Man kan ifrågasätta om det är korrekt att använda ekvationen i detta fall; diskussion om detta återkommer i avsnitt H.4. I detta fall anses metoden ge en rimlig uppskattning av temperaturen i brandgaslagret.

Därefter beräknas temperaturen efter 100 sekunder:

$$h_k = \sqrt{\frac{krc}{t}} = \sqrt{\frac{20000}{100}} = 0.014 \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Tabell, H.2, 100 sekunder

Nr	Q	A <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	h <sub>k</sub>	A <sub>T</sub>	ΔT	T <sub>MQH</sub>	T <sub>CFAST</sub>	T <sub>uppm</sub>
2	40	0.05	0.5	0.014	4.19	620	640	650	600
4	35	0.04	0.4	0.014	4.2	642	660	650	580
7	30	0.03	0.35	0.014	4.21	651	671	650	520
9	30	0.035	0.42	0.014	4.20	600	620	620	600
14	30	0.062	0.25	0.014	4.18	541	561	550	500

Kommentar:

I detta fall hamnar temperaturerna i de flesta fall i den region där ekvationen har ett bättre användningsområde. Fortfarande måste dock effektutvecklingen reduceras då en del av förbränningen sker utanför rummet. Temperaturerna blir relativt rimliga.

Eftersom branden är på gränsen till ventilationskontrollerad görs en sista beräkning vid tidpunkten 50 sekunder.

Tidpunkt: 50 sekunder

$$h_k = \sqrt{\frac{krc}{t}} = \sqrt{\frac{20000}{50}} = 0.02 \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Tabell H.3, 50 sekunder

Nr	Q	A <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	h <sub>k</sub>	A <sub>T</sub>	ΔT	T <sub>MQH</sub>	T <sub>CFAST</sub>	T <sub>uppm</sub>
2	40	0.05	0.5	0.02	4.19	557	577	600	500
4	35	0.04	0.4	0.02	4.2	570	590	620	500
7	30	0.03	0.35	0.02	4.21	578	598	600	500
9	30	0.035	0.42	0.02	4.20	531	551	600	550
14	30	0.062	0.25	0.02	4.18	480	500	600	480

#### Kommentar:

Man kan konstatera att resultaten blir bättre och bättre. Temperaturerna befinner sig i det intervall där ekvationen kan anses gälla. Temperaturgradienten vid denna tidpunkt är mycket snabb; det är därför svårt att avläsa den uppmätta temperaturen med någon större noggrannhet. Resultaten får anses vara rimliga.

### H.4 Slutsatser

MQH-metoden har här använts på en försöksserie som kanske inte helt lämpar sig för modellen. Att resultaten blir bättre och bättre ju tidigare i brandförloppet vi utför beräkningen beror på att branden då är närmare bränslekontroll. Man kan konstatera att resultaten tyvärr styrs till stor del av vad användaren väljer som indata. Mest avgörande är vilken effektutveckling som används. Att uppskatta hur stor del av effekten som förbränns utanför rummet är en mycket svår uppgift.

Man kan dra följande generella slutsatser:

- Metoden kan användas för att uppskatta temperaturen relativt väl i denna försöksserie.
- Samtidigt kan man konstatera att dessa bränder går mycket snabbt mot ventilationskontroll, något som modellen inte är uppbyggd för. Det gör att resultatet till stor del beror på vad ingenjören stoppar in. Detta gäller i och för sig för många modeller, men att bedöma hur stor del av effekten som förbränns utanför rummet är en mycket svår uppgift.
- Om metoden används måste man göra en omfattande känslighetsanalys för att kunna dra generella slutsatser
- Metoden ger klart bäst resultat under det tidiga brandförloppet då branden är bränslekontrollerad. När ekvivalenskvoten stiger över 1 kommer sannolikt resultatet att bli sämre.



- Värmeövergångstalet har stor inverkan på resultatet och måste därför väljas med omsorg.
- Metoden kan användas för att uppskatta den effekt som krävs för att övertändning skall uppstå i ett rum.
- Om metoden används för att uppskatta tiden som det tar att nå övertändning måste man räkna med att resultatet är mycket osäkert.
- Metoden används bäst på förhållanden där temperaturen är avsevärt lägre än vid övertändning.

Om man jämför denna handräkningsmetod med CFAST måste man konstatera att CFAST är bättre p.g.a. att programmet själv tar hänsyn till att en del av effekten förbränns utanför rummet, och framför allt eftersom CFAST kan beräkna värmeövergången till väggar och tak på ett bättre sätt. MQH-metoden har ju också en klar begränsning i det faktum att man enbart kan räkna på ett rum. Viktigt är också att MQH- metoden bygger på en förenklad energibalans.

MQH-metoden är framtagen för material i den omslutande konstruktionen som motsvarar värdena för gips. Den får därför anses gälla bäst i detta område. Om väggarna består av material som leder energi mycket bra ger modellen inte så tillförlitliga värden. Problemet med vissa handräkningsmodeller är att de inte behandlar värmeledningsproblemet fullständigt.

Brandens placering är mycket viktigt. Som exempel kan nämnas att om det krävs ca 475 kW för att orsaka övertändning i ett fiktivt brandrum när branden är placerad i mitten av rummet krävs det 400 kW om den är placerad vid väggen och 340 kW om den är placerad i hörnet. Detta beror på att det sugas in mindre luft i plymen när branden är placerad vid väggar och i hörn; detta gör att brandgastemperaturen blir högre än när branden är placerad i mitten av brandrummet.

### ***H.5 Referenser***

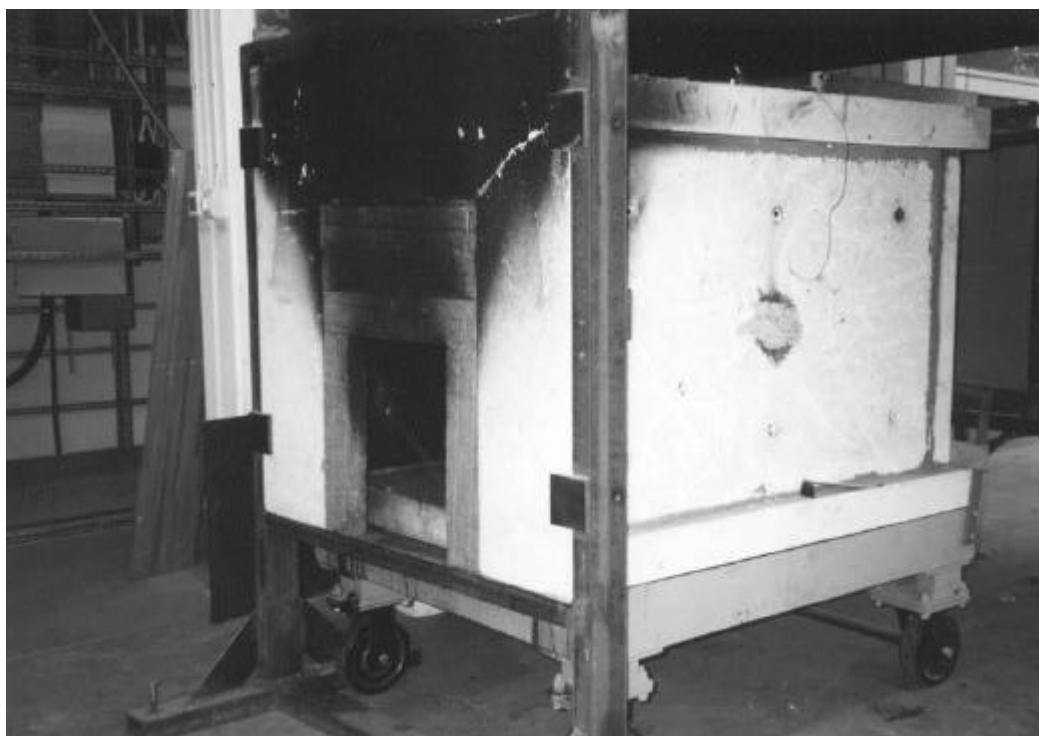
/H.1/ Karlsson, B., Quintiere, J.G., Enclosure Fire Dynamics, Institutionen för brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1997

## Appendix I: Småskaleförsök som enbart videofilmades

### *I.1 Småskala i laboratoriet på brandteknik, Lund 1/9-5/9 1997*

**Syfte:** Syftet med försöken var att studera skillnaden i brandförloppet beroende på vilka ytskikt som fanns i rummet. I vissa försök var ytskiktet brännbart, i andra obrännbart. Framför allt studerades hur förbränningen av brandgaslagret sker. I vissa fall kommer brandgaslagret att börja brinna på undersidan. Huruvida detta inträffar beror till stor del på öppningens storlek.

**Utförande:** Försöken utfördes i s.k. tredjedelsskala i laboratoriet på institutionen för brandteknik. Öppningens storlek varierades med hjälp av hård mineralull som anpassades för att man skall få erforderlig öppning. Ytskiktet varierades med hjälp av skivor av olika slag som fästes på insidan av rummet. Som initialbrand användes en propanbrännare eller en skiva av polyuretan. Försöken videofilmades framifrån.



Figur I.1, Rummet som användes under försöken.

## ***I.2 Försöksbeskrivning***

### **Försök 1:** Tisdag 2/9

Spånskivor på väggar och tak  
Gasolbrännare 15 KW  
Öppningens bredd 0.56m  
Två mineralullskivor för att få ner ”soffiten”  
07:12 Släckt

### **Försök 2:** Onsdag 3/9

Spånskivor på väggar och tak  
Gasolbrännare 15KW  
Öppningens bredd: 37cm  
Öppningens höjd: 36 cm  
ca 13:00 släckt

### **Försök 3:** Onsdag 3/9

Polyuretan (0.5\*0.5) \*2  
Öppningens höjd: 37cm  
Öppningens bredd: 36 cm  
Släckt : 8:00

### **Försök 4:** Torsdag 4/9

Öppningens höjd: 37cm  
Öppningens bredd : 36cm  
Polyuretan (0.5\*0.5)\*2 och brännbara väggar och tak  
Släckt: 03:38

### **Försök 5:** Torsdag 4/9

Öppningens höjd: 37 cm  
Öppningens höjd: 36 cm  
Gasolbrännare 15KW  
Spånskiva på väggar, träfiberskiva i tak  
Släckt: 06:54

### ***I.3 Slutsatser***

- Tak- och väggmaterialet är i vissa fall betydande för hur lång tid som åtgår för att nå övertändning. Resultat från många småskaleförsök visar ofta på stora skillnader i tid till övertändning då ytskikten är brännbara respektive obrännbara. Dessa försök utförs dock ofta utan övrig brandbelastning, t.ex. inredning. Ofta sker också antändningen på den brännbara väggen.
- Om antändning sker på t.ex. en möbel och branden inte direkt får fäste på vägg- och takmaterialet kommer inte de brännbara ytskikten att bidra till att övertändningen sker snabbare.
- Om bränslet är placerat på väggar och tak kommer övertändningen att ske på ett visst sätt. Om bränslet enbart är placerat i golvnivå kommer övertändningen att se annorlunda ut.
- Strax före övertändningen sker kan man observera att brandgaslagret snabbt sänks. Därefter sugs ny luft in och brandgaslagret höjs samtidigt som det antänds. Detta är karakteristiskt för övertändningsperioden.
- Öppningens höjd och bredd är avgörande för hur lång tid det tar att nå övertändning.
- Man kan också konstatera att brandgaslagret kommer att brinna på undersidan om öppningen görs liten. Detta beror på att ekvivalenskvoten ökar. Syrehalten strax under taknivå är mycket låg och inte tillräcklig för att en flamma skall kunna existera. Flamman kommer istället att utvecklas på undersidan av brandgaslagret.