En metodik för att utvärdera brandskadescenario på kärnkraftverk

Nils Johansson
Patrick van Hees

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

Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Lund 2011

Rapporten har finansierats av Nationella brandsäkerhetsgruppen

En metodik för att utvärdera brandskadescenario på kärnkraftverk

Nils Johansson
Patrick van Hees

Lund 2011

En metodik för att utvärdera brandskadescenario på kärnkraftverk

A methodology for assessing fire damage scenarios in nuclear power plants

Nils Johansson
Patrick van Hees

Report 3159
ISSN: 1402-3504
ISRN: LUTVDG/TVBB--3159--SE

Number of pages: 42
Illustrations: Nils Johansson

Keywords:
Fire safety, nuclear power plant, FDS, gas temperatures

Sökord:
Brandskydd, kärnkraftverk, FDS, brandgastemperaturer

Abstract:
There are a large number of fire scenarios at nuclear power plants that must be analysed to obtain a picture of the fire risk. This report presents a schematic method that can be useful when identifying areas where deeper analysis is necessary. The methodology is based on four possible scenarios. Accepted and generally used calculations methods are available for three of these scenarios. As for the fourth scenario, smoke layer temperature in an adjacent room, there are no general and useful correlations available. For this reason is a large part of this report devoted to describing how such a correlation has been developed. The smaller validation study of the correlation made in the report is promising, but further validation are considered necessary

The presented methodology presented provides a rough idea of the fire risks and can be used as a support for decisions on further analysis.

© Copyright: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University
Lund 2010.

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

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

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

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

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

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

Förord

Denna rapport ingår som en del i ett större projekt, ”Varför blir visa småbränder stora?”. Detta projekt syftar till att ta fram kunskap om vilka faktorer som leder till att vissa bränder utvecklas till storbränder och undersöka om det finns karakteristiska mönster specifika för storbränder i olika typer av objekt.

Projektet ”Varför blir små bränder stora?” är finansierat av BRANDFORSK och NBSG (Nationella Brandsäkerhetsgruppen). Föreliggande rapport är specifik finansierad av NBSG. NBSG är en samarbetsorganisation där representanter för de svenska kärnkraftsanläggningarna, Strålsäkerhetsmyndigheten och Svensk Kärnbränslehantering AB ingår. Gruppens arbete ska leda till samordningsvinster på brandsäkerhetsområdet genom att gemensamt finansiera forskning, tester, informationsspridning mm.

Lund, 15 september 2011

Nils Johansson
Patrick van Hees

Summary

This report is part of a larger project called "Why do some small fires grow large?". The project aims to generate knowledge about the factors that lead to that some fires become large fires, and whether there are characteristic patterns specific to large fires in different types of objects.

A developing fire can generally be described in the following qualitative terms:

1. Fire in the first items
2. Fire in the room of origin
3. Fire in several rooms
4. Fire in several fire compartments
5. Fire in several buildings

This report studies fires in nuclear power plants (NPP). Fires at NPP:s are often limited and spreads very rarely outside the room of origin, therefore are the transitions between points 1 and 2 and between points 2 and 3 of interest in this report.

A large number of fire scenarios must be analysed at a NPP to obtain a complete picture of the fire risk. This report presents a schematic method that can help to identify areas where further analysis of fire risks is necessary. The methodology is based on four possible scenarios. Accepted and generally used calculations methods are available for three of these scenarios. All three methods are rough, but can be used as a first indicator of whether further analysis is necessary or if sufficient safety margins exist. To do this first analysis, tables and figures presented in Chapter 3 and 4 can be used.

As for the fourth scenario, smoke layer temperature in an adjacent room, there are no general and useful correlations available. For this reason is large part of this report devoted to describing how such a correlation has been developed. The developed correlation is based on results from computer simulations with the computer model Fire Dynamics Simulator (FDS). The smaller validation study of the correlation made in the report is promising, but further validation attempts in scale and full-scale deemed necessary to be able to validate the correlation.

The methodology presented provides a rough idea of the fire risks and can be used as a support for decisions on further analysis.

Sammanfattning

Denna rapport ingår i ett större projekt som heter ”Varför blir vissa småbränder stora?”. Projektet syftar till att ta fram kunskap om vilka faktorer som leder till att vissa bränder utvecklas till storbränder och undersöka om det finns karakteristiska mönster specifika för storbränder i olika typer av objekt.

Omfattning på en brand kan generellt beskrivas i följande kvalitativa termer:

1. Brand i startföremål
2. Brand i startutrymme
3. Brand i flera rum
4. Brand i flera brandceller
5. Brand i flera byggnader

I denna rapport studeras bränder på kärnkraftverk. Bränder på kärnkraftverk är ofta begränsade och sprids mycket sällan utanför startutrymmet och därför studeras övergången mellan punkt 1 och 2 samt mellan punkt 2 och 3 ovan i denna rapport.

På ett kärnkraftverk finns ett stort antal scenario som måste analyseras för att få en komplett bild av brandriskerna. I rapporten presenteras en schematisk metodik för att utreda inom vilka områden djupare analyser är nödvändiga. Metodiken består av en scenarioanalys som bygger på fyra möjliga scenarier. För tre av dessa scenarier finns utarbetade och vedertagna handberäkningsmetoder som kan användas. Samtliga dessa tre metoder är grova men kan användas som en första indikator på om ytterligare analyser är nödvändiga eller om tillräckliga säkerhetsmarginaler finns. För att göra denna första analys kan de tabeller och figurer som presenteras i kapitel 3 och 4 användas.

När det gäller det fjärde scenariot, brandgastemperaturer i bredvidliggande rum, har det tidigare inte funnits någon generell och användbar korrelation. Av den anledning så ägnas en stor del av denna rapport till att beskriva hur en sådan korrelation har tagits fram. Den framtagna korrelationen som tagits fram bygger på datorsimuleringar i datormodellen Fire Dynamics Simulator vilket utgör en förenkling av verkligheten. Den mindre valideringsstudie av korrelationen som görs i rapporten är dock lovande men ytterligare valideringsförsök i skala och full-skala bedöms vara nödvändiga för att med säkerhet kunna fastställa ett bra korrelationsuttryck.

Metodiken som presenteras ger en grov uppfattning om brandriskerna och kan används som ett stöd för beslut om ytterligare analyser.

Innehållsförteckning

NOMENKLATURLISTA **8**

1 INLEDNING **9**
1.1 BAKGRUND 9
1.2 SYFTE 10
1.3 MÅL 10
1.4 KVALITATIV BESKRIVNING AV ETT BRANDFÖRLOPP 10
1.5 KVALITATIV BESKRIVNING AV MÖJLIGA SKADESCENARIER 11
1.5.1 System i samma rum *11*
1.5.2 System i samma "Fire Cell" men i olika rum *11*
1.5.3 System i olika "Fire Cells" *11*
1.6 SCENARIO 12

2 BRANDGASSPRIDNING MELLAN RUM **13**
2.1 TEORI 13
2.2 FRAMTAGNING AV KORRELATION 15
2.2.1 Tidigare relaterade arbeten *15*
2.2.2 CFD modellering *15*
2.2.3 Statistikanalys *16*
2.2.4 Validitet *18*
2.2.5 Effektutveckling *19*
2.2.6 Gridkänslighet *19*
2.3 BEGRÄNSNINGAR MED KORRELATIONEN 20

3 PÅVERKAN GENOM STRÅLNING **21**
3.1 BRAND I SAMMA RUM 21
3.2 BRAND I OLIKA RUM 22

4 PÅVERKAN GENOM VÄRMELEDNING GENOM VÄGG **23**

5 DISKUSSION **25**
5.1 KOPPLING TILL PROJEKTET: "VARFÖR BLIR VISSA SMÅBRÄNDER STORA?" 25

6 REFERENSER **27**

BILAGA A – BRANDGASTEMPERATUR I NÄRLIGGANDE RUM **29**
VALIDERING MED EXPERIMENT 29
NBS 1988 ..... *30*
University of Canerbury 2001 ..... *31*
Brandteknik Lunds Tekniska Högskola 2011 ..... *32*

BILAGA B – VÄRMESTRÅLNINGSBERÄKNINGAR **35**

BILAGA C – VÄRMELEDNINGSBERÄKNINGAR **41**

Nomenklaturlista

A_T	= total omslutande ej inkl. öppningar (m^2)
$A_{T,1}$	= total omslutande ej inkl. öppningar i rum 1 (m^2)
$A_{T,2}$	= total omslutande ej inkl. öppningar i rum 2 (m^2)
c_p	= specifika värmekapaciteten (kJ/(kgK))
D^*	= karakteristiska branddiametern (m)
h_k	= värmeöverföringskoefficient (kW/m^2K)
k	= termisk konduktivitet på väggar och golv material (kW/mK)
$k\rho c$	= värmetröghet ($J/m^2\ s^{1/2}K$)
$\dot{m}_g$	= massflödet brandgaser ut från ett rum (kg/s)
$\dot{m}_{g,1-2}$	= massflödet brandgaser från rum 1 till rum 2 (kg/s)
$\dot{m}_{g,2-out}$	= massflödet brandgaser ut från rum 2 (kg/s)
$\dot{q}_{loss}$	= summan av värmeförluster från brandgaslagret (kW)
$\dot{q}_{loss,1}$	= summan av värmeförluster från brandgaslagret i rum 1 (kW)
$\dot{q}_{loss,2}$	= summan av värmeförluster från brandgaslagret i rum 2 (kW)
$\dot{Q}$	= effektutveckling från brand (kW)
Q^*	= dimensionslös effektutveckling.
δ	= tjocklek på väggar/tak (m)
T_g	= brandgastemperatur (K)
T_a	= temperatur på omgivande luft (K)
t	= tiden (s)
t_p	= termisk penetrationstid (s)
ΔT	= temperaturskillnad jämfört med omgivande temperatur (K)
VF_2	= ventilationsfaktor öppning mellan rum 2 och utsidan ($m^{5/2}$)
VF_1	= ventilationsfaktor öppning mellan rum 1 och rum 2 ($m^{5/2}$)

1 Inledning

Denna rapport ingår som en del i ett större projekt, ”Varför blir vissa småbränder stora?” [1]. Projektet syftar till att ta fram kunskap om vilka faktorer som leder till att vissa bränder utvecklas till storbränder och undersöka om det finns karakteristiska mönster specifika för storbränder i olika typer av objekt. Kunskapen kan användas till att förbättra brandskyddet och därigenom på sikt reducera antalet storbränder. Storbränder kan ses som bränder med stor omfattning som t.ex. en övertänd vindsbrand eller skola, som studerats tidigare i projektet [2, 3]. En storbrand kan även definieras som en brand som får stora konsekvenser. Sådana bränder kan vara bränder som inträffar i en verksamhet där branden kan innebära att verksamheten stoppas eller att följdeffekter uppstår som orsakar betydligt större skada. Exempel på en sådan verksamhet är kärnkraft där en störning kan få stora konsekvenser i from av att verksamheten måste stoppas.

1.1 Bakgrund

En byggnad delas brandtekniskt upp i olika brandceller [4]. En brandcell kan bestå av ett eller flera rum. Brand- och brandgasspridning regleras generellt inte förutom att det finns föreskrifter för hur brandspridning inom brandcell skall förhindras genom användning av vissa typer av ytskikt. Generellt vid brandteknisk schablon dimensionering tas ingen hänsyn till hur rumsavskiljande, ej brandklassade konstruktioner, påverkar brand- och brandgasspridningen.

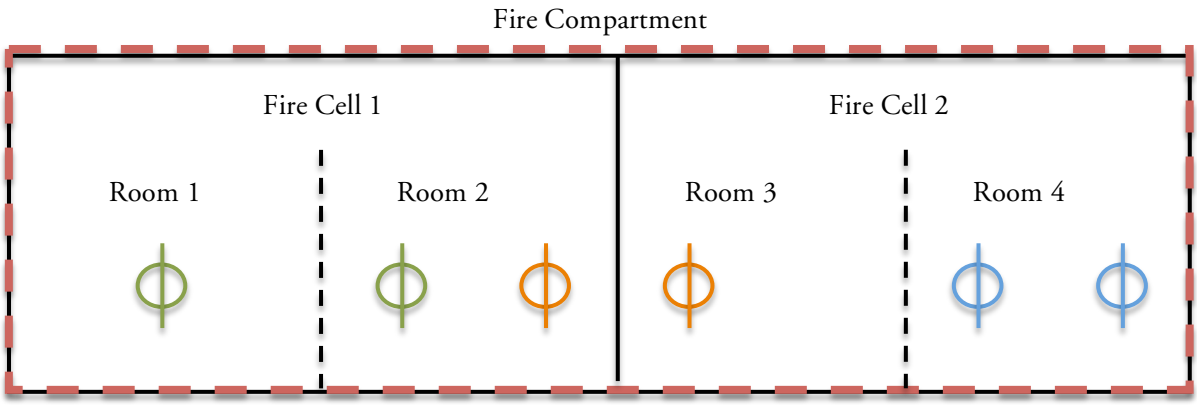
På kärnkraftverk finns dock ytterligare en nivå. Inom kärnkraftindustrin benämns brandcell på engelska som ”Fire Compartment” sedan förekommer även begreppet ”Fire Cell”. Begreppet ”Fire Cell” skall inte förväxlas med ”brandcell”. Där det inte är möjligt att upprätta konventionella brandcellsgränser används ”Fire Cells”. Varje ”Fire Cell” kan bestå av en del av ett rum, ett eller flera rum och en brandcell kan bestå av flera ”Fire Cells”. ”Fire cells" kan separeras från varandra genom att:

- Brandbelastningen minimeras
- Känslig utrustning redundant utrustning separeras med avstånd
- Passiva brandskyddsåtgärder, t.ex. brandtåliga väggar.
- Aktiva system, t.ex. sprinklersystem.

Begreppet ”Fire Cell” har ingen vedertagen svensk översättning och därför används ”Fire Cell” fortsättningsvis i rapporten. I kvalitetsmanualen för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar [5] beskrivs och diskuteras de olika begreppen ytterligare.

En kombination av aktiva och passiva åtgärder kan innebära ett tillräckligt skydd. En ”Fire Hazard Analysis” skall visa att de vidtagna åtgärderna är tillräckliga för att undvika att redundanta system som är viktiga för säkerheten och som ligger i olika ”Fire Cells” slås ut [4].

De redundanta system (skyddsobjekt) som avses i denna rapport är elektrisk utrustning. Det finns inga fastlagda kriterier för vilken temperatur eller strålningsintensitet som elektrisk utrustning klarar av. I försök gjorda av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut har brott på kretsar observerats vid 70°C (340 K) på kretskort [6]. Denna temperatur är lägre än temperaturkriteriet på andra sidan av brandavskiljande konstruktioner. Några skadekriterier definieras inte i denna rapport men finns omnämnda i tidigare rapporter [5].



Figur 1: Illustration av hur kritiska system kan vara placerade.

I Figur 1 redovisar möjliga placeringar av de skyddsobjekt som avses i rapporten. I ”Fire Cell 1” är de gröna systemen placerade i olika rum medan de blåa systemen är placerade i samma rum i ”Fire Cell 2”. De orange systemen är placerade i olika ”Fire Cells”.

Eftersom antalet möjliga skyddsobjekt, viktiga komponenter, är stort innebär det att det finns ett stort antal scenario som måste analyseras för att få en komplett bild av situationen. En metod att avgöra ifall det finns en risk för att ett kritiskt system kan slås ut vid en brand är därför eftersträvansvärd.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport att beskriva de möjliga scenarier där redundanta kritiska system kan slås ut av en rumsbrand.

1.3 Mål

Målet är att presentera en metodik för att avgöra om det finns risk för att redundanta kritiska system i samma brandcell kan slås ut vid en brand och på så sätt undvika att en liten brand får stora konsekvenser.

1.4 Kvalitativ beskrivning av ett brandförlopp

Ett brandförlopp kan lite grovt delas in i fyra stycken faser: det tidiga brandförloppet, övertändning, fullt utvecklad brand och avslutande fas.

I början av det tidiga brandförloppet kan branden ligga och pyra innan den har fått riktigt fäste i startföremålet. En del brandgaser kan produceras under denna tid, som kallas förbrinntiden. När branden har fått fäste i startföremålet så kommer den sannolikt öka i intensitet om inte någon person agerar eller ett släcksystem aktiverar. Om branden är i ett rum kommer brandgaser att ansamlas och det bildas ett varmt övre lager i rummet. Under det varma lagret finns ett lager med relativt opåverkad luft med en temperatur som kan vara bara några grader över normal rumstemperatur. Brandgaserna som ansamlas i rummet kan spridas via dörrar eller andra öppningar (t.ex. ventiler eller ventilationskanaler) till andra rum i byggnaden. Under det tidiga brandförloppet kan branden spridas från startföremålet men är i regel bränslekontrollerad, vilket innebär att det är mängden bränsle som är involverat i branden som avgör hur stor branden är vid en viss tidpunkt. Då branden växer sig större kan mängden syre bli begränsad, s.k. ventilationskontroll,

Om det blir tillräckligt varmt i rummet så kan det leda till övertändning vilket innebär att allt brännbart i rummet börjar brinna. Det finns ingen klar definition på övertändning men det kan beskrivas som ”den snabba övergången till ett tillstånd där alla brännbara ytor i ett utrymme är involverade i branden”. Övertändningen karaktäriseras av en brandgastemperatur som överstiger 600°C, en värmestrålning mot golvet som överstiger 20 kW/m^2, och flammor som uppträder i rumsöppningarna [7]. När eller om övertändning sker beror på olika flera faktorer, såsom bränslemängd, bränslets egenskaper, bränslets placering, den omgivande geometrin, syretillgång och tillståndet i det övre heta brandgaslagret.

Perioden efter övertändning karakteriseras av att temperaturen i rummet håller sig på en mer eller mindre konstant nivå (800 till 900°C) och kallas för fullt utvecklad brand. Luften och brandgaserna i rummet blandas i och med att övertändning och den tydliga siktningen med två lager försvinner. I vanliga rumsgeometrier begränsas den fullt utvecklade brandens effektutveckling främst av storleken på de tilluftsöppningar som finns till rummet, branden blir ventilationskontrollerad. Vid ventilationskontrollerade bränder finns det inte tillräckligt med syre i rummet för att förbränna pyrolysgaserna. Förbränningen kommer i stället att ske utanför rummets öppningar, t.ex. i angränsande rum, där det finns gott om syre. Detta innebär att även brandspridning kan ske till andra rum om det inte redan har skett.

Då den största mängden brännbart material i rummet har förbränts, sjunker temperaturen och brandens avslutande fas påbörjas. Om branden har varit ventilationskontrollerad kan den återgå till att bli bränslekontrollerad när mängden återstående bränsle minskar.

1.5 Kvalitativ beskrivning av möjliga skadescenarier

I Figur 1 illustreras det att system som ligger i samma brandcell kan hotas av brand genom påverkan av varma brandgaser, påverkan av strålning eller påverkan genom värmeledning genom en vägg. Följande möjliga problemområden finns:

1. System i samma rum
2. System i samma "Fire Cell" men olika rum
3. System i olika "Fire Cells"

Om övertändning sker bedöms det inte vara meningsfullt att beakta punkt 1 och 2 ovan eftersom skadekriterierna för de system som vill skyddas kommer att överstigas i brandrummet och förmodligen även i närliggande rum eftersom oförbrända brandgaser förbränns utanför brandrummet.

System i samma rum

Om en brand uppstår i rummet kommer brandgaser som potentiellt kan skada båda systemen att utvecklas. Brandgaserna stiger mot taket och bildare ett varmt brandgaslager. Även värmestrålningen från branden kan skada systemen. Branden kan dessutom utvecklas och spridas vidare från startföremålet vilket innebär att direkt flampåverkan kan förstöra funktionen av systemen. Om övertändning kan ske bedöms det ej meningsfullt att göra någon vidare analys eftersom skadekriterierna för de system som skall skyddas sannolikt kommer överstigas i brandrummet.

System i samma "Fire Cell" men i olika rum

I de fall känslig utrustning separeras med en vägg kan utrustningen påverkas om den är i direkt kontakt med en vägg som värms upp alternativ av den brandgas som kan spridas mellan rummen via öppningar (dörrar) eller ventilationssystem. En vägg kan även kollapsa helt om den ej är dimensionerande att stå emot en brand. Om övertändning är möjlig är det förmodligen ej nödvändigt att göra någon vidare analys eftersom skadekriterierna för de system som skall skyddas sannolikt kommer att överstigas även utanför brandrummet.

System i olika "Fire Cells"

Båda systemen i olika "Fire Cell" kan potentiellt påverkas om brandbelastningen överstiger det som definierats som begränsade. En för stor brandbelastning kan innebära att en brand blir större (sprids i rummet) och/eller pågår under en längre tid än vad systemet är aktuell "Fire Cell" är dimensionerad för. Detta kan medföra att känslig utrustning som separeras med avstånd kan påverkas eftersom värmestrålningen från branden kommer överstiga en kritisk nivå. Den större branden kan även medföra att brandgasproduktion blir större än vad systemet dimensionerats för.

I de fall känslig utrustning separeras med passiva brandskyddsåtgärder, t.ex. brandtåliga väggar kan möjligen utrustningen påverkas om den är i direkt kontakt med en vägg som värms upp. System som ej tål den värme som leds igenom en väg kan då skadas. Även aktiva system kan fallera om t.ex. branden som startar är större än vad de aktiva systemen dimensionerats för. Om de aktiva eller

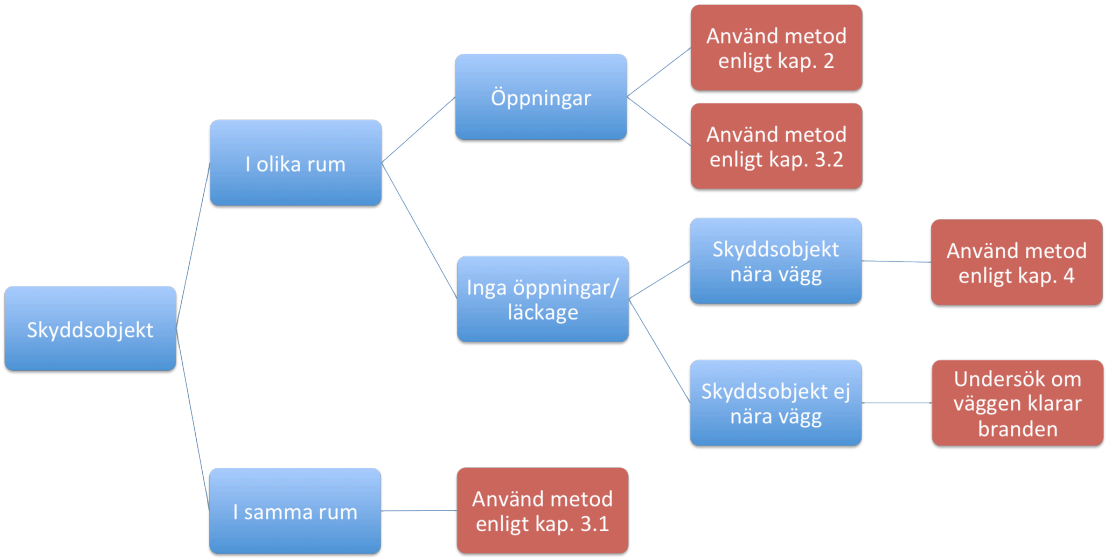
passiva systemen felfungerar eller ej är rätt dimensionerande kan även det innebära att en "Fire Cell" ej kan upprätthållas.

1.6 Scenario

Utifrån den kvalitativa beskrivningen i 1.5 har följande möjliga scenario som kan påverka redundanta system inom en eller i olika "Fire Cell" identifierats:

1. Brandgasspridning mellan rum
2. Värmestrålning mellan rum
3. Värmestrålning mellan objekt
4. Värmeöverföring genom väg

De olika scenariernas relation till varandra är beskrivna i Figur 2.



Figur 2: Schematiskt tillvägagångsätt.

För att utreda om det föreligger risk för att ett kritiskt system slås ut av en brand i samma eller närliggande rum kan schemat i Figur 2 tillsammans med metoderna som är beskrivna i kapitel 2, 3 och 4 användas.

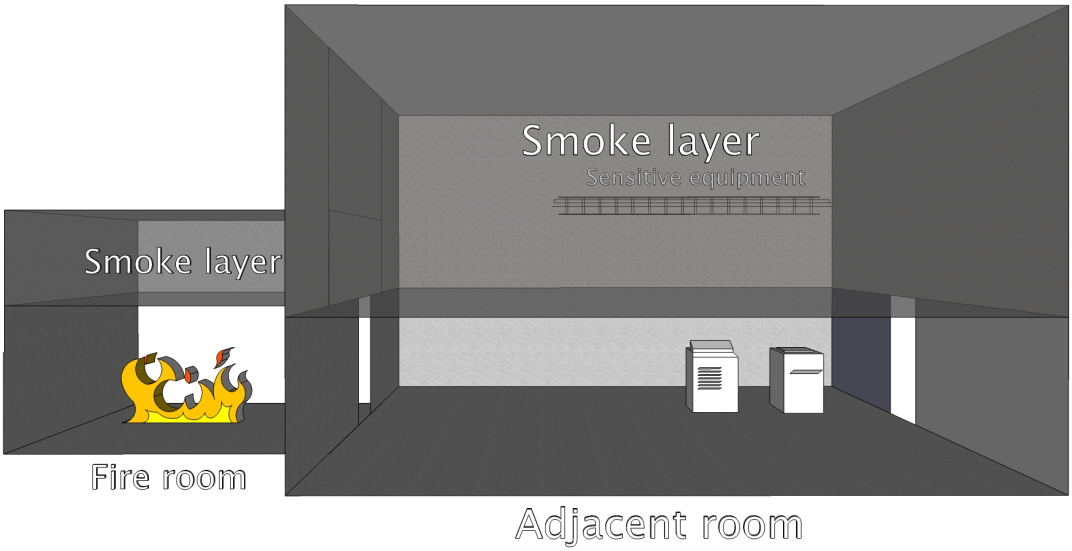
Enligt schemat genomförs en sådan utredning i följande steg.

1. Identifiering av skyddsobjekt d.v.s. det som inte skall skadas vid en brand.
2. Vilka scenarier är möjliga d.v.s. hur ser rumskonfigurationerna ut kan branden starta i samma rum som skyddsobjektet eller i ett närliggande rum.
3. Om skyddsobjekt är placerat i ett annat rum väljs olika metoder beroende på om det finns öppningar mellan rummen eller inte.

Metoden består av en scenarioanalys som kan användas för att erhålla en grov bild av brandriskerna och underlag för beslut om vidare analyser som t.ex. kvantitativa riskanalyser som är beskrivna i kvalitetsmanualen [5]. Det skall även poängteras att metoden inte ersätter den arbetsgång för brandtekniska analyser som finns beskriven i kvalitetsmanualen utan kan snarare vara en del utav denna.

2 Brandgasspridning mellan rum

En brand i ett rum kan inte bara få konsekvenser i rummet som det brinner i utan även i närliggande rum. Figur 3 illustrerar problematiken med brand i ett rum med en öppning till ett annat rum där ett känsligt system som är skyddsvärt finns. Rummen kan ligga i samma ”Fire Cell” eller i olika ”Fire Cells”.



Figur 3: Illustration av problematiken med brandgasspridning mellan rum.

2.1 Teori

Korrelationer som kan prediktera brandgastemperaturer i enkla rum har funnits sedan i början av åttiotalet [8, 9] och de används fortfarande i olika sammanhang vid brandtekniska analyser. Dessa korrelationer är baserade på förenklingar av verkligheten och kan därför ge mindre korrekta resultat jämfört med datorsimuleringar, men de har fördelen av att vara enkla och snabba att använda. Metoden som McCaffrey et al tagit fram [8], vanligen kallat MQH-korrelationen, bygger på en enkel energibalans (ekvation 1). Den värme som tillförs ett rum antas försvinna enbart genom värmeledning genom väggar och genom flöde av brandgaser ut genom öppningar. I energibalansen bortses det från strålningen ut från rummet och den energi som finns i brandgaserna.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{q}_{loss} \qquad (1)$$

$\dot{Q}$ är den effekt som tillförs genom branden och den första termen på vänster sida är energiförluster genom flödet av brandgaser ut genom rummets öppningar. I den andra termen, $\dot{q}_{loss}$ som är värmeförluster till väggar, antas det att ytan på väggen håller samma temperatur som brandgaserna vilket innebär följande samband.

$$\dot{q}_{loss} = h_k A_T (T_g - T_a) \qquad (2)$$

Termen h_k är en värmeöverföringskoefficient och utseendet på den beror på om värmeledningen genom väggarna uppnått ett stationärt tillstånd ($t \geq t_p$) eller inte. Termen h_k är svår att bestämma och resultaten kan variera mycket beroende på hur h_k beräknats.

$$h_k = \sqrt{k\rho c/t} \qquad t < t_p \qquad (3)$$

$$h_k = k/\delta \qquad t \geq t_p \qquad (4)$$

För väggar, tak och golv sammansatta av flera material kan, h_k, beräknas med ekvation 5.

$$h_{k,total} = \frac{1}{\Sigma \frac{1}{h_k}} \tag{5}$$

Energibalansen går inte att lösa utan att genomföra iterering. McCaffrey et al använde därför ett dimensonslöst utryck, baserat på energibalansen, där konstanterna C, M och N bestämdes med ett hundratal experimentella observationer. Uttrycket är framtaget utifrån ekvation 1 och 2 och $\dot{m}_g$antas vara lika med $\sqrt{g}\rho_a A_0 \sqrt{H_0}$.

$$\frac{\Delta T}{T_a} = C \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g}\rho_a c_p T_a A_0 \sqrt{H_0}} \right)^N \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g}\rho_a c_p A_0 \sqrt{H_0}} \right)^M \tag{6}$$

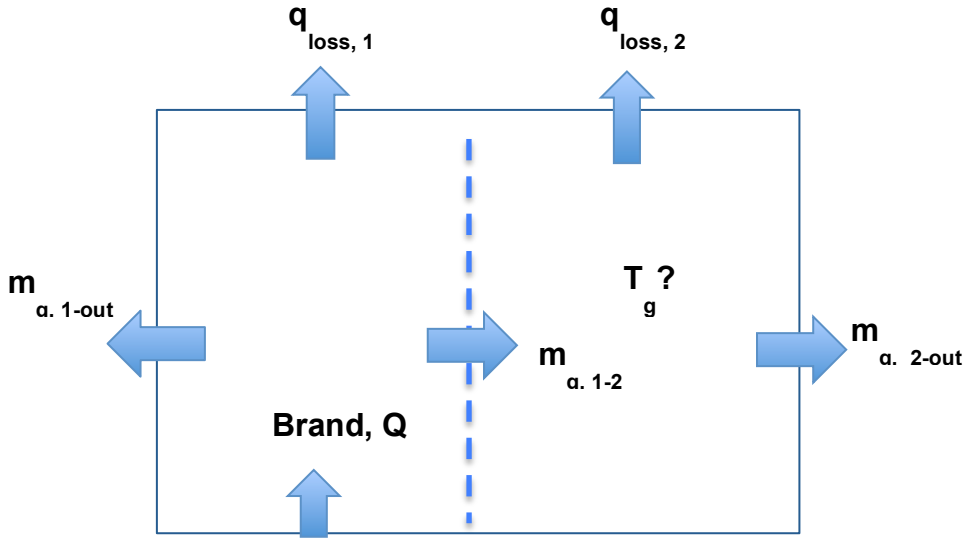
MQH korrelation ger gas temperaturen som en funktion av den alstrade effektutvecklingen, ventilationsöppningar, inhägnad geometri och omslutande väggar, golv och taks termiska egenskaper (se ekvation 4).

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 \sqrt{H_0} h_k A_T} \right)^{1/3} \tag{7}$$

MQH korrelation har en uppsättning begränsningar som användaren måste vara medveten om, men sambandet har visat sig ge goda förutsägelser av brandgastemperaturer vid rumsbränder [10].

Nyligen har nya modeller för att förutsäga brandgastemperaturer presenterats [11, 12]. Vilket visar att det finns ett intresse av förenklade korrelationer. Det finns dock inga samband som kan förutsäga temperaturer utanför brandrummet. Således måste sådana förutsägelser göras med hjälp av tvåzons- eller CFD-modeller. Sådana modeller är i regel bra men det är lätt för en användare, med bristfälliga kunskaper om modellerna, att göra fel. Det kan dessutom vara tidskrävande att använda modellerna. Det är därför eftersträvansvärt att ta fram ett enkelt beräkningsutryck som kan användas för att göra en första grovanalys och för att uppskatta om vidare analyser är nödvändiga.

En energibalans liknande den i ekvation 1 kan sättas upp för en två rumskonfiguration (se Figur 4).



Figur 4: Illustration av värmebalans.

I fallet då brandrummet enbart har en öppning till rum 2 kan termen $\dot{m}_{g,1-out}$ strykas vilket innebär att följande balans kan ställas upp.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{g,2-out} c_p (T_g - T_a) + \dot{q}_{loss,1} + \dot{q}_{loss,2} \tag{8}$$

De ingående parametrarna för att lösa energibalansen är således de samma som för ett rum enligt McCaffrey et al. Det går inte att lösa energibalansen direkt utan en lösning måste itereras fram. En sådan lösning kan för varje enskilt fall tas fram med en zon- eller CFD-modell.

2.2 Framtagning av korrelation

För att erhålla en korrelation för en två-rumskonfiguration används inte verkliga experiment som vid framtagningen av MQH-korrelationen utan istället används datorsimuleringar. Chow och Zou [13] har tidigare använt datorsimuleringar för att skapa empiri för erhålla en enkel korrelation för massflöden genom dörrar skapade av bränder.

Korrelationen tas fram i tre steg. Först genomförs ett antal CFD simuleringar, i det andra steget tas ett regressionsutryck fram med hjälp av den statistiska programvaran SPSS. Det tredje steget omfattar en initial validering genom att jämföra hur väl korrelationen stämmer överens med tidigare utförda experiment.

Tidigare relaterade arbeten

Onnermark et al [14] presenterade ett antal storskaliga försök där brandgasspridning mellan en mindre lokal till en större studerades. Onnermark et al såg att det i deras experiment serie fanns ett linjärt samband mellan brandgastemperaturerna i de båda lokalerna, men att det sambandet berodde starkt på ventilations- och bränsleparametrar vilket inte undersöktes.

Nakaya et al [15] har visat att ventilationsfaktorn $A_o\sqrt{H_o}$ även kan användas för att beskriva massflödet mellan två rum och inte bara mellan ett brandrum och det fria. Chow och Zou [13] jämförde sina resultat med de som Nakaya et al erhöll.

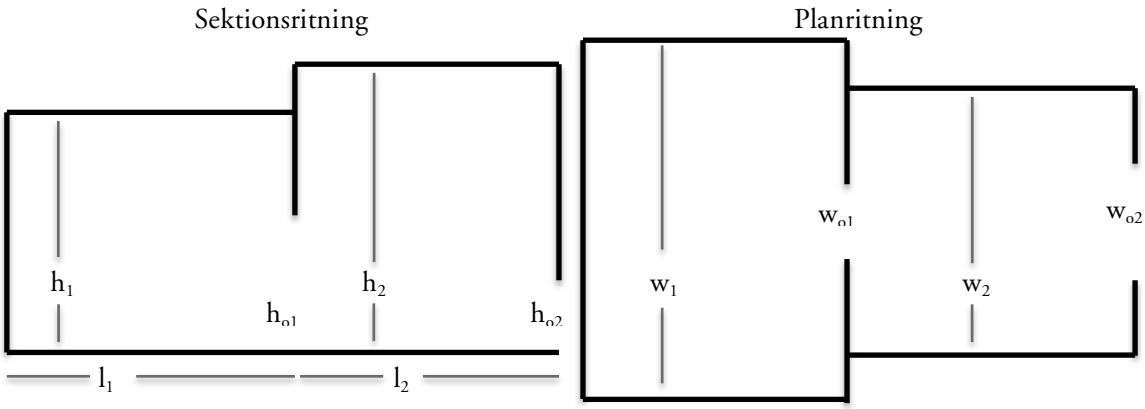
Brand & Feldt [16] har i ett examensarbete tagit fram en modell för att skatta frekvensen för att ett skadekriterium (temperatur) uppnås i ett angränsande rum som är förbundet med brandrummet genom en dörr. Det värde (s.k. DOP-värdet) som erhålls i modellen menar författarna kan användas i kärnkraftverkets PSA. I arbetet skapades regressionsutryck för totalt 25 rumskombinationer där brandeffekt och tid användes som indata. Uttrycket är dock begränsat och har inte validerats mot experiment.

CFD modellering

Hundratals CFD simuleringar bedömdes nödvändiga för att kunna erhålla ett samband. Därför skapades ett Matlab script med vilket indata filer med olika rumskonfigurationer till CFD-koden Fire Dynamics Simulator (FDS) [17] kunde genereras. Åtta stycken variabler varierades och dessa valdes ut som variabler eftersom de förekommer som parametrar i den presenterade energibalansen (ekvation 5). Som beroende variabel användes brandgastemperaturen i brandgaslagret i rum 2 vilken kunde erhållas från CFD simuleringarna. Dimensionerna på rummen hölls så att begränsningar som finns för två-zonsmodeller följdes [18].

Tabell 1: Variabler som varierades i samtliga simulering, enheten är meter.

Variabler	*Bredd (w) (min/max)*	*Längd (l) (min/max)*	*Höjd (h) (min/max)*
Rum 1 (brandrum)	2.4/12	2.4/12	2.4/4.5
Rum 2	2.4/12	2.4/12	2.4/4.5
Storlek på öppning 1-2	0.5/2.2	-	1/3.7
Storlek på öppning 1-ut	0.5/2.2	-	1/3.7



Figur 5:Illustration av geometriska variabler.

Brandeffekten varierades mellan 320 och 2000 kW och placerades i centrum av brandrummet. FDS använder en förenklad förbränningsmodell vilket innebär att programmet fungerar bäst vid fullständig förbränning, något som inte sker vid underventilerade bränder. Det är således osäkert om resultat från simuleringar där ventilationen varit begränsande är tillförlitliga. Det kontrollerades därför i samtliga simuleringar att branden var bränslekontrollerad.

Tabell 2: Variabler som varierades i simulering

Sim. nummer	*Väggmaterial*	*Tjocklek på vägg*	*Bränsle*
1-10	Tegel	0.1	Heptan
11-20	Lättbetong	0.1	Heptan
21-30	Betong	0.1	Heptan
31-40	Betong	0.2	Heptan
41-50	Betong	0.1	Polystyren
51-60	Betong	0.01	Polystyren
61-70	Tegel	0.1	Metan
71-80	Tegel	0.01	Metan
81-90	Tegel	0.2	Heptan
91-100	Lättbetong	0.1	Heptan
101-110	Lättbetong	0.1	Metan
111-120	Lättbetong	0.1	Polystyren
121-130	Betong	0.1	Metan
131-140	Betong	0.2	Metan
141-150	Tegel	0.1	Polystyren

Samtliga simuleringar kördes i 1200 sekunder. Utdata från simuleringar togs vid fyra tidpunkter.

Egenskaper från de tre väggmaterialen är hämtade från Karlsson & Quintiere [19], dessa tre väggmaterial valdes eftersom de är vanligt förekommande i byggnader. Bränslen valdes för att få en spridning i energiinnehåll och sot egenskaper. Data om bränslen är hämtade från SFPE handboken [20]. Tjockleken på väggen har varierats och h_k har beräknats utifrån om värmeledningen genom väggen är transient eller stationär. Omgivande lufttemperatur var 20°C i samtliga simuleringar och förekommer således inte som en variabel i analysen.

Statistikanalys

Ett visst bortfall erhölls eftersom ventilationskontrollerade förhållande uppstod i ett par av simuleringarna. Totalt kunde dock data från ca 100 simuleringar användas och eftersom utdata togs vid fyra tidpunkter i varje simulering innebär det att ca 400 observationer kunde användas i den statistiska analysen. Antalet observationer per variabler är drygt 60 vilket anses bra eftersom det normalt rekommenderas minst 10-20 observationer per variabel vid en multipel regressionsanalys [21].

En linjär multipel regressionsanalys av de logaritmerade variablerna genomfördes i den statistiska programvaran SPSS genom. Precis som i MQH-korrelationen användes ventilationsfaktorn, $A_o\sqrt{H_o}$, för att beskriva massflödet mellan de två rummen och mellan det yttre rummet och det fria samt värmeöverföringskoefficienten, h_k, för att beskriva värmeflödet genom väggarna. Rummens geometri beskrivs med den totala omslutande arean A_{T1} respektive A_{T2}.

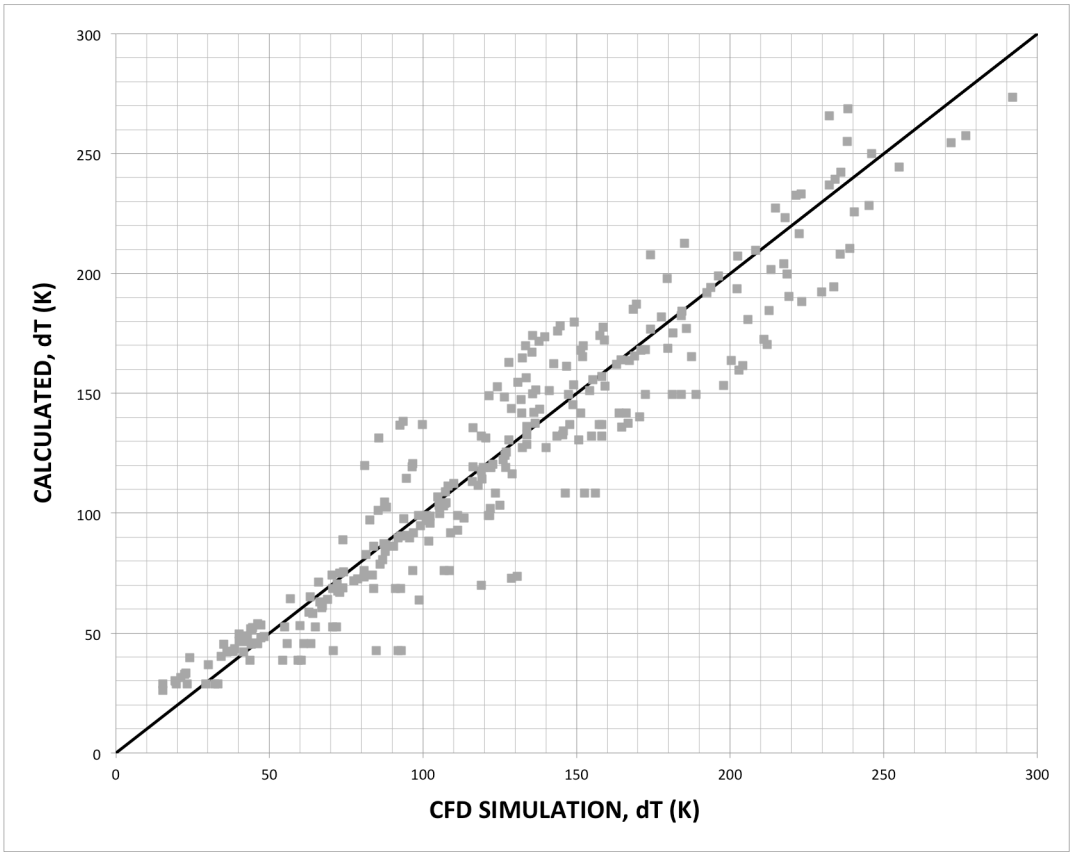
Tabell 3: Koefficienter i regressionsanalysen av de logaritmerade variablerna

Variabel	*Enhet*	*Beskrivning*	*Koefficient*
$\dot{Q}$	kW	Brandeffekten som utvecklas i brandrummet	0,716
$A_{T,1}$	m^2	Omslutande area i brandrummet	-0,460
$A_{T,2}$	m^2	Omslutande area i rum 2.	-0,263
$V_{F,1}$	$m^{5/2}$	Ventilationsfaktor från brandrum till 2.	0,220
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	Ventilationsfaktor från rum 2.	-0,208
h_k	kW/m^2K	Värmeöverföringskoefficient	-0,253
C	-	Konstant	1,141

Samtliga variabler var signifikanta på 5%-nivån och den erhållna regressionslinjen har ett R^2-värde på 0,90. Variablerna i Tabell 3 kan även åskådliggöras i form av en ekvation. I ekvationen har konstanten C justerats med 0,991 för att kompensera vid transformeringen från logartimerade värden.

$$\Delta T = 13.7 \cdot \frac{\dot{Q}^{0.716} \cdot VF_2^{0.220}}{A_{T,1}^{0.460} \cdot A_{T,2}^{0.263} \cdot VF_1^{0.208} h_k^{0.253}} \qquad (9)$$

Ekvation 9 kan användas enligt tillvägagångssättet i Figur 2 för att få en grovuppskattning av temperaturen i ett rum sammankopplat med ett brandrum enligt Figur 3.



Figur 6: Diagram som visar simulerade mot beräknade värden på temperaturökningen (dT).

Figur 6 visar de simulerade resultaten i FDS mot de beräknade värdena med den korrelation som erhållits vid regressionsanalysen. Linjen som visar i figuren är inte regressionslinjen utan en linje som illustrerar perfekt överenstämmelse.

Validitet

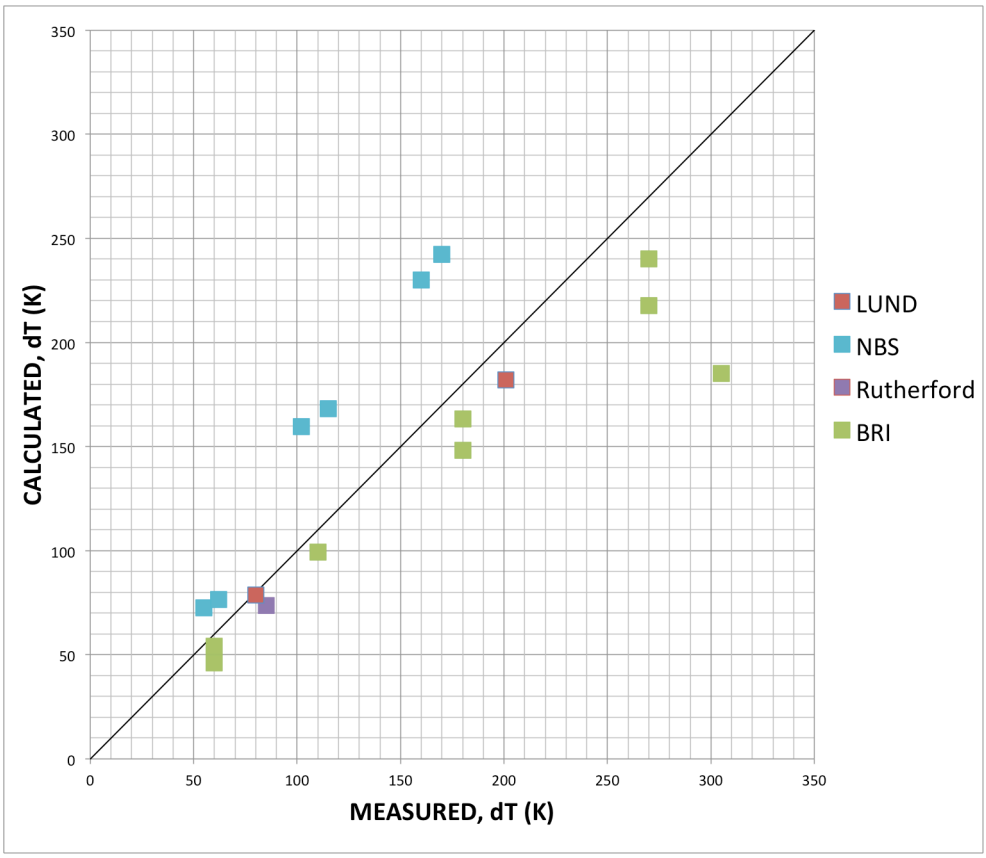
Med validitet i detta sammanhang avses att studera hur den aktuella korrelationen motsvarar verkligheten. Detta är viktigt eftersom korrelationen bygger på ett datorprogram som är en förenkling av verkligheten.

Flertalet fullskaleexperiment har genomförts under 80, 90 och 00-talet där brandgasspridning mellan flera rum studerats. Huvudsyftet med flera av dessa experiment har varit att validera datormodeller vilket gör att de även kan tillämpas för att validera den framtagna korrelationen. En mindre litteratursökning har genomförts för att se om det går att hitta resultat från genomförda experiment där temperatur mäts i ett närliggande rum. Det förekommer flera publikationer där sammanställningar gjorts av experiment serier där tvårums- (eller fler) konfigurationer testas [22, 23]. I många fall finns dock inte nödvändig data publicerad för att kunna använda den i denna analys. I Tabell 4 redogörs för de experimentserier som använts för en initial validering av korrelationen, dessa finns mer utförligt beskrivna i bilaga A.

Tabell 4: Experiment serier som bedömts representera det aktuella fallet.

Organisation	*Referens*	*Beskrivning*
BRI	[15]	En försöksserie med två ihopkopplade rum för att studera massflöden genom öppningar genererade av bränder har genomförts av BRI i Japan. I försöken användes en propanbrännare och effektutvecklingen varierades. Även bredden och höjden på dörren mellan brandrummet och det andra rummet varierades.
NBS	[24]	I försöken var ett brandrum sammankopplat genom en dörr öppning med en korridor som i sin tur var sammankopplad med ytterligare ett rum. I försöken varierades och brandeffekten och antalet rum. Temperaturen i de olika rummen mättes med termoelement.
University of Canterbury	[25]	Två stycken ISO-standradrum kopplades samman med en dörröppning. Flera olika förhållanden (olika öppningsstorlek och brandeffekt) skall ha provats dock redovisas enbart resultat från en provning i rapporten.
Brandteknik Lunds Tekniska Högskola	-	Två stycken försök har genomförts i brandövningshuset på MSB:s övningsfält i Revinge i syfte att kontrollera den presenterade korrelationen. Rummen i experimentet var 16 respektive 14 m^2 och brandeffekten varierades.

Experimentserierna i Tabell 4 ger totalt 17 stycken observationer som kan användas för att göra en initial validering av korrelationen. För att kunna använda data från experimentserierna har tolkning av den varit nödvändig. En detaljerad beskrivning av experimentserierna och den tolkning som gjorts ges i bilaga A. I följande diagram återges en linje som representerar prefekt överenstämmelse tillsammans med de empiriska data som hittats.



Figur 7: Jämförelse mellan uppmätta och beräknade värden på dT.

Experimentserien från NBS tenderar att bli överskattad i beräkningarna, anledningen till detta är sannolikt att det andra rummet var avlångt och uppfyller inte kraven för zonmodeller [18]. Försöksserien från BRI avviker också från korrelationen för de höga effektutvecklingarna. En orsak till detta kan vara att försöken varit ventilationskontrollerade och att en del av den propan som använts förbränts i det andra rummet. Det är även viktigt att poängtera att stora osäkerheter finns i uppskattning av h_k.

Mot bakgrund av detta bedöms samtliga fyra experimentserier ge en bra överensstämmelse med den framtagna korrelationen.

Effektutveckling

Vid genomförande av simuleringar I FDS finns det några riktlinjer för kontroll av branden och dess effektutveckling [5]. Den dimensionslösa effektutvecklingen, Q* är ett mått på hur stark branden är i förhållande till sin yta. I normala bränder skall Q* ligga i intervallet 0,3 och 2,5.

$$Q^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gD}D^2}\right) \qquad (10)$$

I de genomförda simuleringarna är Q* mellan 1,34 och 2,12 med ett medel på 1,85 vilket är inom det angivna intervallet.

Gridkänslighet

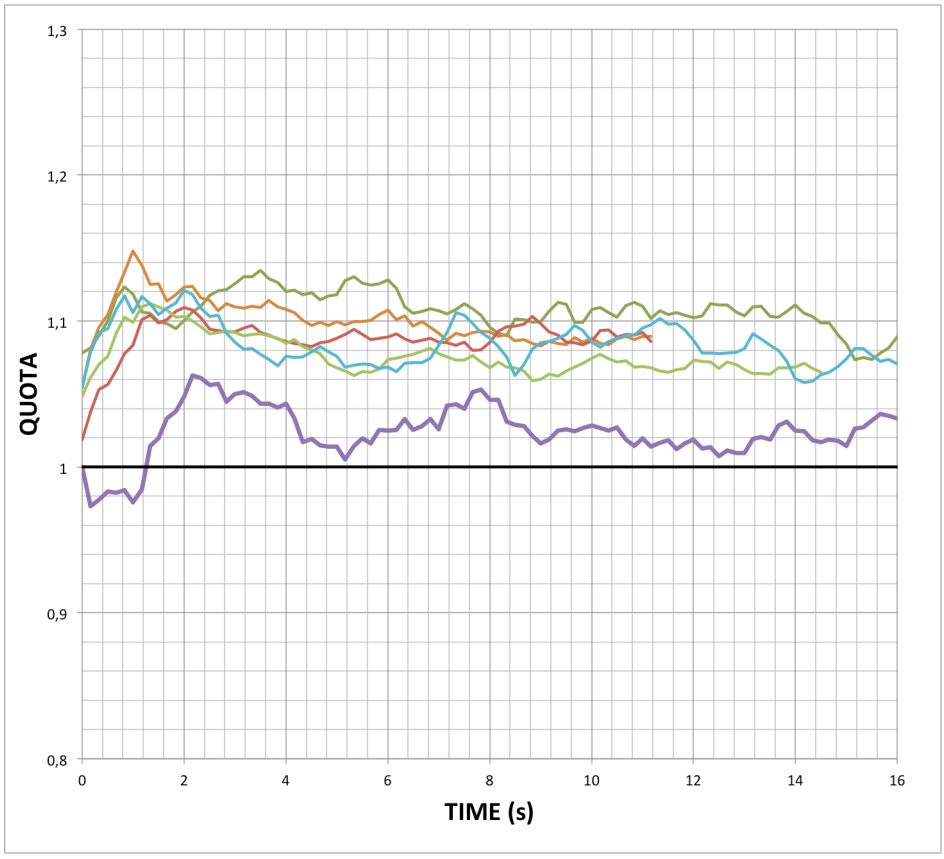
I samtliga simuleringar användes två grider eftersom de två rummen hade varsin grid. Cellstorleken, δx, var i samtliga simuleringar 10 cm vilket medförde att antalet celler varierade mellan 48000 och 459000 i de drygt 100 simuleringarna som användes i den statistiska analysen.

Den karakteristiska branddiametern, D*, kan användas för att få en uppfattning av nödvändig storlek på cellerna.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{2/5} \quad (11)$$

Det rekommenderas att använda en gridstorlek så att kvoten D*/δx är mellan 5 och 10 [26]. I de aktuella simuleringarna har kvoten legat mellan 6,1 och 12,6 med ett medel på 7,8.

För att undersöka grindkänsligheten har storleken på cellerna, δx, i sex CFD simuleringen halverats. Detta medför att det totala antalet celler ökar med åtta. Resultat från grindkänslighetsstudien visas i Figur 8 som en kvot mellan original griden (10 cm) och den finare griden (5 cm).



Figur 8: Presentation av grind känslighetsstudie.

Överensstämmelsen är bra men generellt överskattas temperaturen något med 10 cm grid.

2.3 Begränsningar med korrelationen

Korrelationen bygger på datorsimuleringar som är en förenkling av verkligheten, det hade varit bättre om modellen grundats på experimentell data. Sådana data är dock betydligt mer kostsam att ta fram och dessutom kan förhållandena vara svåra att kontrollera vid försök. Valideringsstudier av FDS har dock visat att programmet kan förutsäga brandgaslagrets temperatur i brandrummet och i intilliggande rum tillfredställande [26].

Modellen gäller för avgränsande bränder innan övertändning inträffar. Modellen förutsätter att det finns öppningar mellan rummen och öppning ut från det närliggande utrymmet (se

Figur 5). Öppningarna är dörröppningar eller motsvarande. De geometriska begränsningarna av korrelationen ges av min och max-värdena i Tabell 1 vilka är i linje med rekommenderade begränsningar av tvåzonsmodeller [18]. Vidare bygger modellen på att branden är placerade i centrum av brandrummet, en brand som är placerad invid en vägg eller i ett hörn kommer att ge andra förhållande.

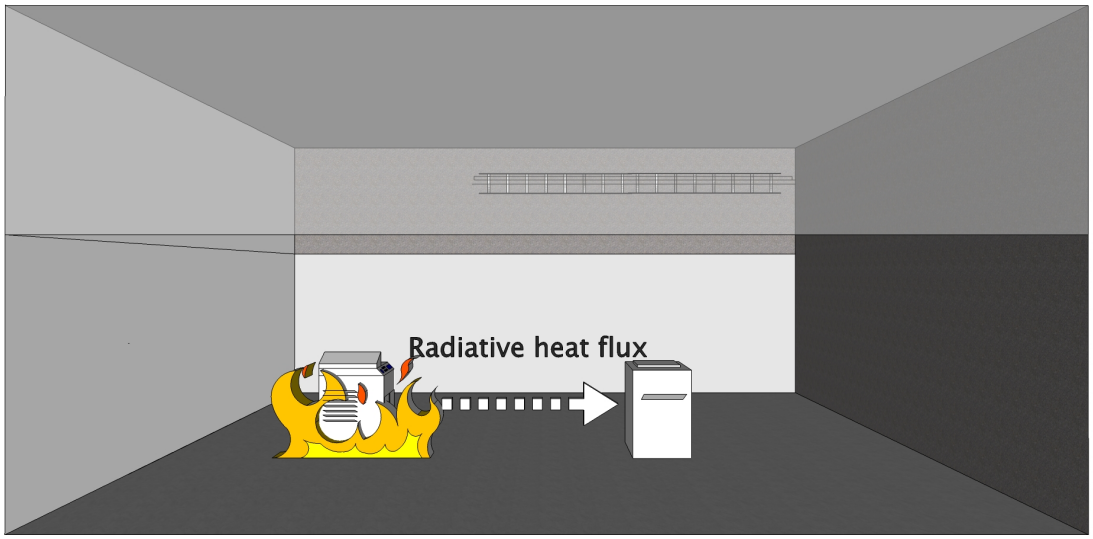
Omgivande temperatur har inte varierats i simuleringarna och förutsätts därför vara 20°C. Om verklig omgivande temperatur avviker mycket från 20°C bör inte korrelationen användas.

3 Påverkan genom strålning

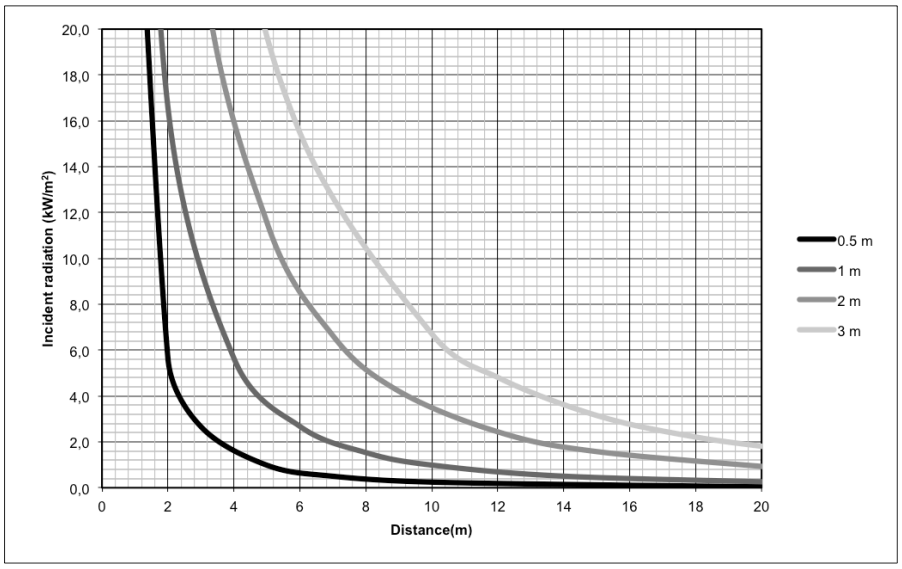
Strålningspåverkan från en brand i samma rum och brand i ett annat rum tas upp här. För detta skadescenario finns redan framtagna och vedertagna metoder som används.

3.1 Brand i samma rum

Storleken på en brand i ett föremål beror på vad som brinner samt tillgången på syre. Det förutsätts att syre finns tillgängligt. I Figur 9 presenteras resultatet av ett antal strålningsberäkningar utförda med vedertagna metoder (se bilaga B). I beräkningen har det antagits att branden är formad som en cylinder och strålar mot ett annat objekt i rummet. I beräkningen har det även antagits att temperaturen i flammorna är 1000°C eftersom denna temperatur är vanlig för sotande flammor [7]. Strålning från fyra stycken olika brandstorlekar (diametrar) visas i Figur 10.



Figur 9: Illustration av problematiken.

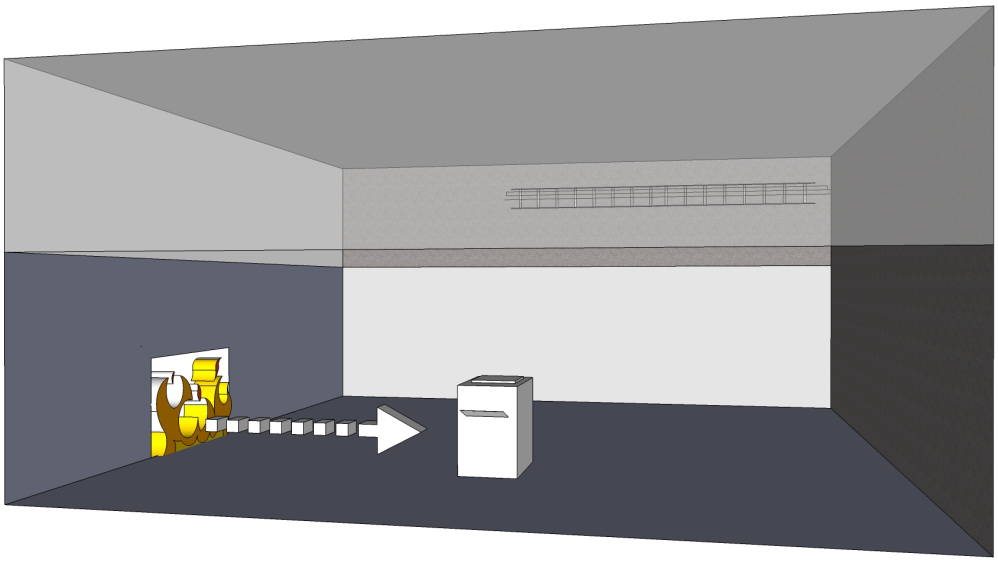


Figur 10: Värmestrålning från bränder med olika diametrar.

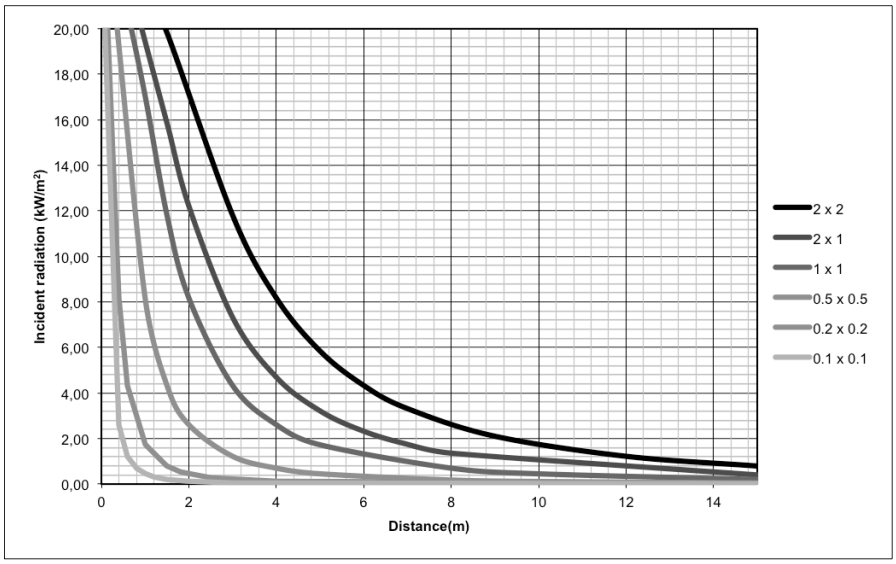
Figur 10 kan användas för att se på vilket avstånd en viss infallande strålning från en flamma kan uppkomma, under förutsättning att storleken på branden är känd. Diagrammet gäller för en cylinder som är 1000°C, om flammorna bedöms kunna vara varmare skall inte diagrammet användas. Den beräkningsgång som använts vid framtagandet av grafen återges i bilaga B.

3.2 Brand i olika rum

Vid brand i ett rum kan strålning från en öppning (t.ex. dörröppning) påverka känslig utrustning i det andra rummet, se Figur 11. I Figur 12 presenteras resultatet av ett antal strålningsberäkningar utförda med vedertagna metoder (se bilaga B). I beräkningen har det antagits att öppningen, i form av en rektangel strålar in i det angränsande rummet. I beräkningen har det även antagits att temperaturen i det andra rummet är 600°C. Temperaturer över 600°C bedöms sannolikt inte kunna uppstå i dörröppningen innan övertändning inträffar och om övertändning uppstår kommer brandgaser att förbrännas utanför brandrummet. Strålning från sex stycken storlekar på öppning (höjd x längd) visas i Figur 12.



Figur 11: Illustration av problematiken.

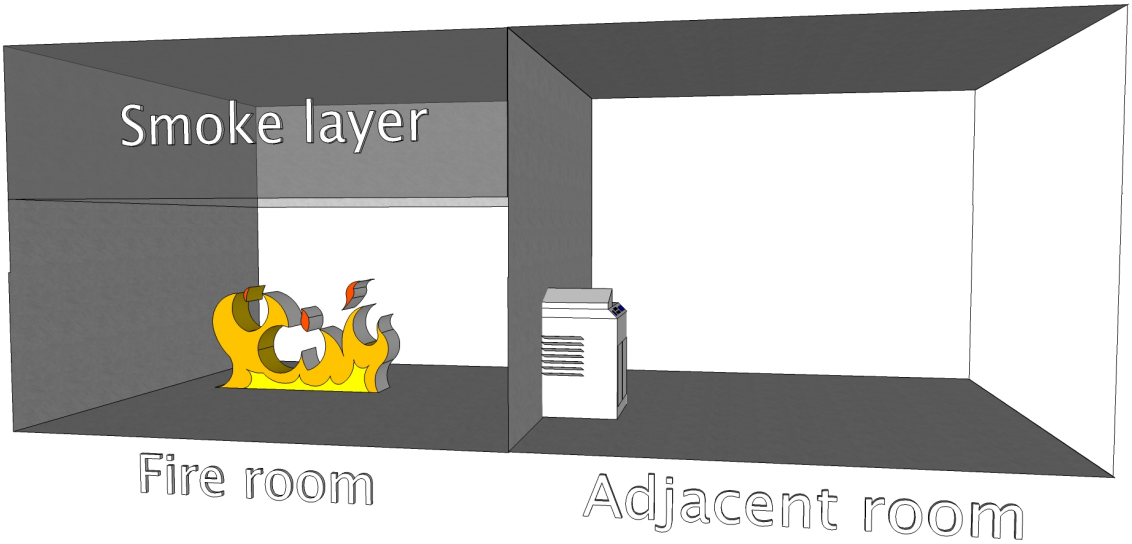


Figur 12: Värmestrålning från öppning.

Figur 12 kan användas för att se på vilket avstånd en viss infallande strålning från en öppning kan uppkomma. Diagrammet gäller för en strålande yta som är 600°C, om ytan bedöms kunna vara varmare skall inte diagrammet användas. Den beräkningsgång som använts vid framtagandet av grafen återges i bilaga B.

4 Påverkan genom värmeledning genom vägg

Värmeledning genom en vägg från ett rum med en fullt utvecklad brand till ett annat rum berörs i detta kapitel.



Figur 13: Illustration av problematiken.

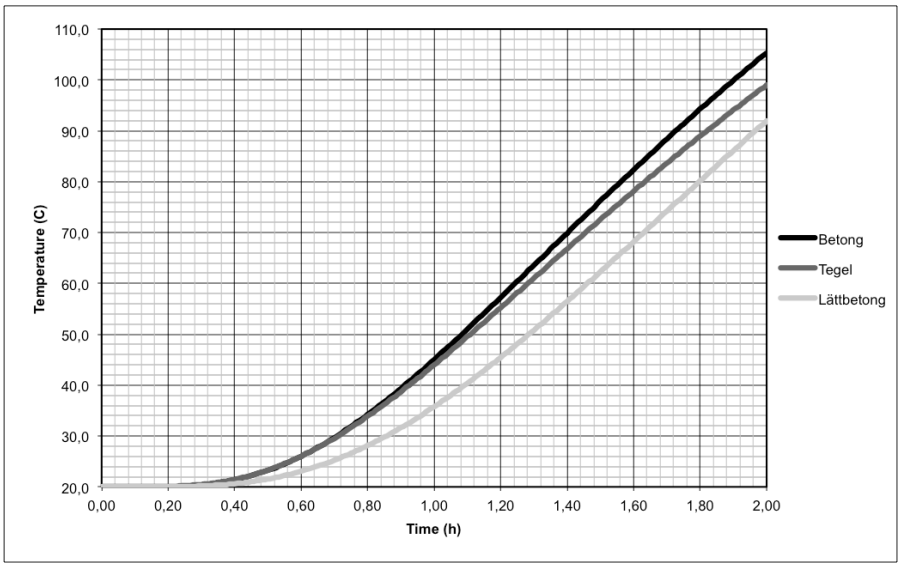
När byggnadselement provas för att klassificeras enligt en viss brandklass, som t.ex. EI30 eller EI60 provas elementet mot en fördefinierad temperaturbelastning, t.ex. enligt ISO standard 834. Provmaterialet placeras i en ugn där temperaturen ökar med tiden. ISO834 representerar inte samma värmepåverkan eller varaktighet för en naturlig brand utan är endast en belastning som ISO valt att finna acceptabel. I beräkningarna av värmeledning genom vägg som presenteras här används ISO834 för att representera temperaturbelastningen som påverkar väggen. ISO834 används här eftersom det bedöms vara ett konservativt utryck och eftersom det är inte möjligt att beräkna generella yttemperaturer utifrån naturliga bränder då dessa beror på flera faktorer som kommer att variera starkt mellan olika rum.

Beräkningarna av temperaturer har gjorts med vedertagna metoder [27] som presenteras i bilaga C. Tid till 70°C på motsatt yta för olika material i tre olika tjocklekar visas i Tabell 5.

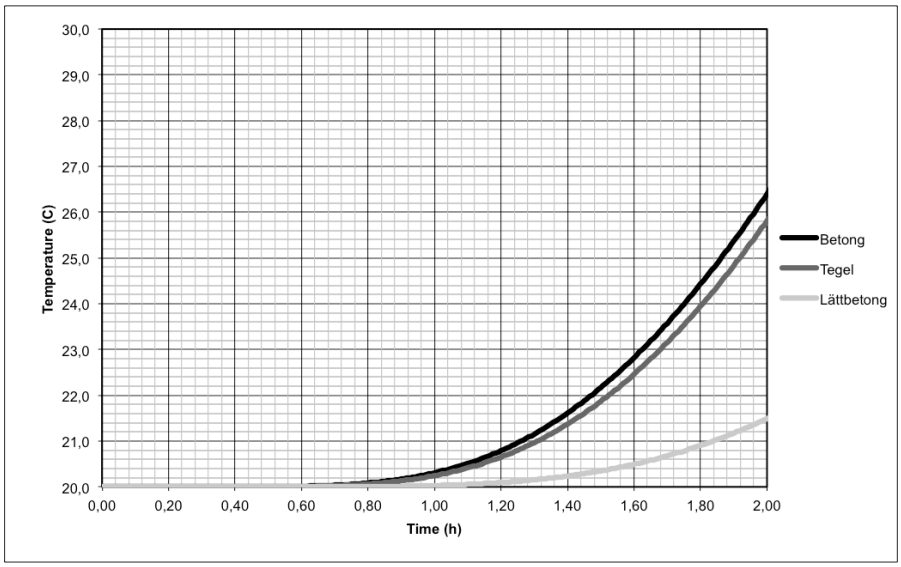
Tabell 5: Tid till 70°C på motsatt yta för olika material i tre olika tjocklekar.

Betong			*Tegel*			*Läggbetong*		
0,1 m	0,2 m	0,3 m	0,1 m	0,2 m	0,3 m	0,1 m	0,2 m	0,3 m
88 s	295 s	>500 s	85 s	292 s	> 500 s	98 s	385 s	>500 s

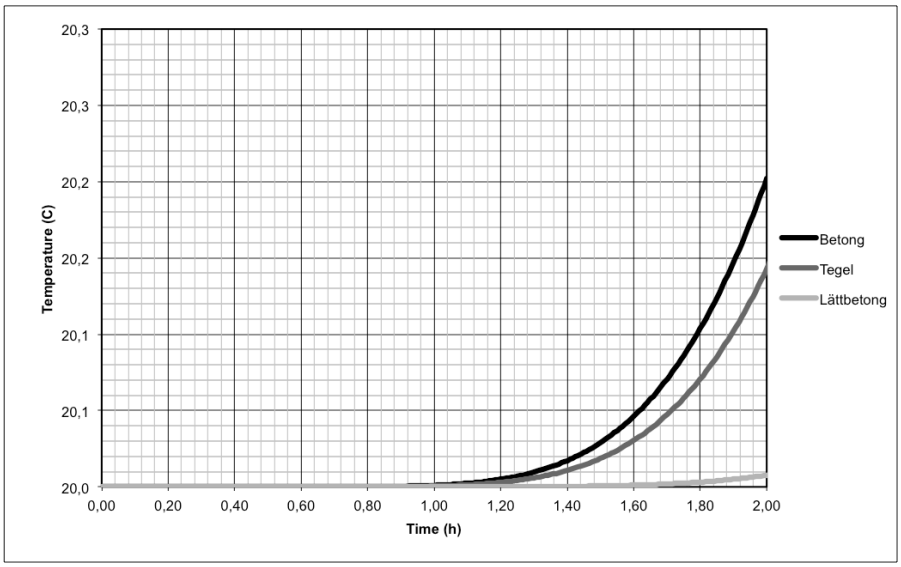
I Figur 14-16 redovisas temperaturen som funktion av tiden för tre olika väggtjocklekar. Tabell 5 och Figur 14-16 kan användas enligt tillvägagångssättet i Figur 2 för att få en uppfattning om riskerna för utrustning på andra sidan väggen.



Figur 14: Värmeledning genom 10 cm tjock vägg.



Figur 15: Värmeledning genom 20 cm tjock vägg



Figur 16: Värmeledning genom 30 cm tjock vägg.

5 Diskussion

Inom kärnkraftindustrin används begreppet ”Fire Cell”. Då det inte är möjligt att upprätta konventionella brandcellsgränser används ”Fire Cells”. Om ett redundant system placeras i en ”Fire Cell” är det nödvändigt att utreda ifall systemet kan ta sådan skada vid en brand att systemet slås ut.

På ett kärnkraftverk finns ett stort antal scenario som måste analyseras för att få en komplett bild av situationen. I rapporten presenteras en schematisk metodik för hur problemet kan angripas för att utreda inom vilka områden djupare analyser är nödvändiga. Metodiken bygger på fyra möjliga scenarier och är schematiskt beskriven i Figur 2. För tre av dessa scenarier finns utarbetade och vedertagna handberäkningsmetoder som kan användas. Samtliga dessa tre metoder är grova men kan användas som en första indikator på om ytterligare analyser av en ”Fire Cell” är nödvändiga eller om tillräckliga säkerhetsmarginaler finns. För att göra denna första analys kan de tabeller och figurer som presenteras i kapitel 3 och 4 användas.

När det gäller brandgasspridning mellan rum så har det tidigare inte funnits någon generell och enkel korrelation för att bestämma brandgastemperaturen i ett rum som angränsar till ett brandrum. Av den anledning så ägnas en stor del av denna rapport till att beskriva hur en sådan korrelation har tagits fram. Brandförlopp och brandgasspridning är komplexa problem som är svåra att generalisera därför uppstår osäkerheter i en korrelation som skall vara så generell som möjligt för att kunna innefatta så många möjliga typer av bränder och rumskonfigurationer som möjligt.

Den korrelationen som tagits fram bygger på datorsimuleringar i FDS viket utgör en förenkling av verkligheten. FDS har dock validerats vid flertalet tillfällen mot experimentella försök vilket styrker att programmet kan användas för att förutsäga brandgasspridning och brandgastemperaturer. I rapporten görs även en mindre validering av den framtagna korrelationen mot tidigare publicerade experimentella data. Den valideringen visar att korrelationen ger en god överenstämmelse med verkligheten. Resultaten är uppmuntrande men ytterligare valideringsförsök i skala och full-skala bedöms vara nödvändiga för att med säkerhet kunna fastställa ett bra korrelationsuttryck. Korrelationen är framtagen för välventilerade bränder och gäller således för sådana förhållanden. På kärnkraftverk förekommer ofta lokaler med begränsad ventilation vilket gör att den framtagna korrelationen bör användas med försiktighet. Efter ytterligare validering skulle korrelationen kunna användas för att erhålla en konservativ uppskattning av brandgastemperatur då välventilerade förhållande generellt innebär en större möjlig effektutveckling och således även en högre brandgastemperatur.

Metodiken som presenteras i rapporten består av en scenarioanalys som kan användas för att erhålla en grov bild av brandriskerna och underlag för beslut om vidare brandtekniska analyser som t.ex. kvantitativa riskanalyser. Vid brandtekniska analyser är det rekommenderat att följa den arbetsgång som finns för brandtekniska analyser (se Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser på svenska kärntekniska anläggningar [5]) och metodiken som presenteras i denna rapport kan utgöra ett hjälpmedel vid den nämnda arbetsgången.

5.1 Koppling till projektet: ”Varför blir vissa småbränder stora?”

Denna rapport är en del av det större brandforskprojektet: ”Varför blir vissa småbränder stora?”. Storbränder kan ses som bränder med stor omfattning eller som får stora konsekvenser. Det förra har studerats i två tidigare delar i projektet [2, 3] medan det senare tas upp i denna rapport.

Ett brandförlopp går i regel igenom de faser som beskrivs i avsnitt 1.4. I flera fall stannar branden i någon fas t.ex. då bränslet tar slut eller om den släcks. Ett brandförlopp vara snabbt eller långsamt men i regel finns de olika beskrivna faserna med.

Tillväxten av en brand kan beskrivas i kvalitativa termer. Vanligen används följande uppdelning vid t.ex. insamling av statistik:

1. Brand i startföremål
2. Brand i rum
3. Brand I flera rum
4. Brand I flera brandceller

5. Brand I flera byggnader

De tre olika scenarierna som studerats hittills i projektet "Varför blir vissa småbränder stora?" har inneburit en detaljerad studie av olika av dessa delar. Vid fallstudien av skolbränder och vindsbränder har inneburit att focus legat på faktorer som styr punkt 3 och 4 ovan. I föreliggande rapport ligger fokus på faktorer som styr punkt 2 och 3. Att fokus ligger på olika områden medför en bredare förståelse av området.

6 Referenser

1. Van Hees, P. Varför blir vissa bränder småbränder? Projektbeskrivning, Lunds Tekniska Högskola, 2007.
2. Johansson, N. & van Hees, P., En studie av vindsbränder utifrån statistik och brandutredningar. Rapport 3152. Lund: Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2010.
3. van Hees, P. & Johansson, N., Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor? Rapport 3148. Lund: Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2010.
4. IAEA, Protection against Internal Fires and Explosions in the Design of Nuclear Power Plants. No. NS-G-1.7, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
5. Nystedt, F. & Frantzich, H., Kvalitetsmanual vid brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar. Rapport 3160. Lund: Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2011.
6. Isaksson S, Påverkan av rök på elektronik, Brandforsk projekt 610-981, SP rapport 2000:19, Sveriges Provning- och Forskningsinstitut, Brandteknik, Borås, 2000.
7. Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1998.
8. McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G. and Harkleroad, M.F., ”Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations”, Fire Technology, Vol. 17, No. 2, 1981, pp. 98–119.
9. Foote, K.L., Pagni, P.J and Alvares, N.J., ”Temperature Correlations for Forced Ventilation Compartment Fires”, First International Symposium on Fire Safety Science, London, 1986, pp. 139-148.
10. Deal, S. and Beyler, C., ‘‘Correlating Preflashover Room Fire Temperatures’’, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 2, No. 2, 1990, pp. 33–48.
11. Delichatsios, M.A., Lee, Y.P. and Tofilo, P., ‘‘A New Correlation for the Gas Temperature inside a Burning Enclosure”, In: Proceedings of 6th Mediterranean Combustion Symposium, Pittsburgh, The Combustion Institute, 2009.
12. Sharma, P., Quintiere, J.G., “Compartment Fire Temperatures”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 20, No. 4, 2010, pp. 253–271.
13. Chow, W.K., Zou, G.W., ”Correlation equations on fire induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulations”, Building and Environment, 40, 2005, pp. 897-906.
14. Onnemark, B., Jansson, R., Hansson. S-G., Brandrökspridning från liten till stor lokal – experiment. FOA rapport C 20871-2.4. Sundbyberg: Försvarets Forskningsanstalt, 1992.
15. Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M., Steckler, K., ”Doorway Flow Induced by Propane Fire”, Fire Safety Journal, 10, 1986, pp. 185-195.
16. Brand, A. Feldt, M., Bedömning av frekvensen för att ett skadekriterie uppnås till följd av brand. Rapport 5092. Lund: Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2002.
17. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, 5th edition, October 2007. NIST Special Publication 1018-5, Volume 3: Validation.
18. International Organisation for Standardization (ISO), Subsystem 1: Initiation and development of fire and fire effluents, ISO/TC 92/SC 4 N 72 E, 1995.
19. Karlsson, B and Quintiere, J G. Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, 1999.
20. Tewarson, A., Generation of Heat and Gaseous, Liquid and Solid Products in Firess. Chapter 3-4, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth edition. National Fire Protection Association, Quincy. 2008
21. StatSoft Inc, Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft. http://www.statsoft.com/textbook/ [2011-06-17]
22. Audouin, L., Multi-Compartment Fire: State of Art, EMIC-2006-196-PRISME-2006-010, Direction De La Prévention Des Accidents Majeurs, 2006.
23. Chow, W.K., ”Use of Computional Fluid Dynamics for Simulating Enclosure Fires”, Journal of Fire Sciences, vol. 13, no. 4, pp. 300-334
24. Peacock R.D., Stanford, D., Lee, B.T., An experimental data set for the accuracy assesssment of room fire models, NBSIR 88-3752, National Bureau of Standards, 1988.
25. Rutherfoord, L., Experimental Results for Pre-Flashover Fire Experiments in Two Adjacent ISO Compartments, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2002.

26. US.NRC., Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1824.
27. Rockett, J. A., Milke, J. A., Conduction of Heat in Solids. Chapter 1-2, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth edition. National Fire Protection Association, Quincy. 2008.

Bilaga A – Brandgastemperatur i närliggande rum - Validering med experiment

BRI 1986

Building Research Institute (BRI) genomförde en försöksserie med två ihopkopplade rum för att studera massflöden genom öppningar genererade av bränder[1]. I försöken användes en propan brännare och effektutvecklingen varierades. Även bredden och höjden på dörren mellan brandrummet och det andra rummet varierades. Termoelementtråd användes för att mäta temperaturer.

Väggarna bestod av betong som var täckt med en isolerande kalium silikatskiva och hela försöksuppställningen värmdes upp innan försöken för att lättare kunna nå ett stationärt tillstånd

Tabell 6: Dimensionerna på rummen.

Rum	*Bredd (m)*	*Längd (m)*	*Höjd (m)*
Rum 1 (brandrum)	3.45	3.55	2.12
Rum 2	3.45	3.45	2.17
Öppning mellan rum 2 och ut	1.8		1.8

Tabell 7: Dimensioner på öppning mellan rum 1 och rum 2.

Effekt (kW)	*86*	*86*	*170*	*340*	*340*	*600*	*600*	*600*
Dörrbredd (m)	0.29	0.59	0.89	0.59	0.89	0.29	0.59	0.89
Dörrhöjd (m)	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6

Fler försöksuppställningar än de som redovisas i Tabell 7 användes i försöken. Resultaten från dessa redovisas dock inte av Nakaya et al

Ekvation 4 används för att beräkna värmeöverföringskoefficient, h_k eftersom förhållandena betraktas som stationära. I beräkningen av h_k förenklas genom att enbart ta hänsyn till materialen i brandrummet.

Tabell 8: Värmeöverföringskoefficient, h_k.

Material	δ *(m)*	*k (kW/mK)*	h_k *(kW/m²K)*
Betong	0.15	1.80	0.012
Kalcium slikatskiva	0.013	0.12	0.00923

Den totala värmeöverföringskoefficienten beräknas enligt ekvation 5 och eftersom det är olika material i tak och väggar i brandrummet viktas h_k.

Utifrån informationen i Tabell 6 och Tabell 8 kan brandgastemperaturen beräknas med hjälp av den framtagna korrelationen.

Tabell 9: Beräknad temperatur

Effekt (kW)	*86*	*86*	*170*	*340*	*340*	*600*	*600*	*600*
Dörrbredd (m)	0.29	0.59	0.89	0.59	0.89	0.29	0.59	0.89
Dörrhöjd (m)	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6
ΔT i rum 2 (K)	46	54	99	148	163	185	217	240

[1] Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M., Steckler, K., ”Doorway Flow Induced by Propane Fire”, Fire Safety Journal, 10, 1986, pp. 185-195.

Nakaya et al presenteras resultaten från försöken i ett diagram som temperaturen över höjden i rummet. Ur diagrammen erhålls temperaturerna i Tabell 10. Vid uppskattningen av temperaturökningen har det antagits att omgivande luft är 20°C.

Tabell 10: Uppskattad temperatur ökning utifrån presenterade diagram.

Effekt (kW)	*86*	*86*	*170*	*340*	*340*	*600*	*600*	*600*
Dörrbredd (m)	0.29	0.59	0.89	0.59	0.89	0.29	0.59	0.89
Dörrhöjd (m)	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6
ΔT i rum 2 (K)	60	60	110	180	180	305	270	270

NBS 1988

National Bureau of Standards (NBS) i USA presenterar i rapporten ”An Experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models” resultaten från ett antal försöksserier med genomförda brandförsök i en uppställning med tre rum. Data på temperaturer och massflöden samlades in. I försöksserierna varierades flera viktiga fysikaliska parametrar, så som effektutvecklingen, antalet öppningar och om två eller tre rum användes. Syftet med experimenten var att erhålla data som kunde användas för att studera precisionen i datormodeller.

Totalt genomfördes försök i nio olika rums- och öppningskonfigurationer. Av dessa är tre försök (1, 5 och 8) intressanta för validering av den framtagna korrelationen eftersom dessa består av två rum med en öppning mellan och en öppning från det andra rummet ut till det fria (som Figur 3 illustrerar). Dimensionerna i de tre relevanta försöken presenteras i Tabell 11 och Tabell 12. Väggmaterialen i de båda rummen skiljde sig åt något i brandrummet satt en 50 mm tjock keramisk fiber isolering på ett tak och kalciumslikat och väggar av brandtegel (eng. Fire brick). Taket och väggarna i rum 2 bestod av reglar i stål täckta med gipsskivor och en 13 mm tjock kalciumslikat skiva. Betonggolvet i rum 2 täcktes av en 13 mm gipsskiva. Den korta korridoren som gick mellan rum 1 och rum 2 var gjord i samma material som det i rum 2.

Tabell 11: Dimensionerna på rummen i försök 1, 5 och 8.

Rum	*Bredd (m)*	*Längd (m)*	*Höjd (m)*
Rum 1 (brandrum)	2.34	2.34	2.16
Kort korridor från brandrum till rum 2	1.02	1.03	2.00
Rum 2	2.44	12.19	2.44

Tabell 12: Dimensionerna på öppningarna i försök 1, 5 och 8.

Öppningar	*Bredd (m)*	*Höjd (m)*
Rum 1 till korridor	0.81	1.60
Rum 2 till ut	0.76	2.03

I försöken användes en 0.34 x 0.34 m diffusionsbrännare med naturgas. Brännaren placerades tätt intill vägen på bakkanten av brandrummet. Den variabel som skiljer mellan de tre olika försöken var effektutvecklingen vilket framgår av Tabell 13.

Tabell 13: Effektutveckling i de tre försöken.

Försök	*Effektutveckling (kW)*
1	100
5	300
8	500

Det bedöms inte som om stationära förhållanden inträtt under försöken. Därför används ekvation 3 för att beräkna värmeöverföringskoefficient, h_k. De omslutande ytorna i försöken bestod av olika material i de olika rummen vilket gör det svårt att beräkna h_k. I beräkningen av h_k förenklas därför genom att hänsyn enbart tas till de materialen i brandrummet.

Tabell 14: Värmeöverföringskoefficient, h_k.

Material	*kρc (J/m² s^1/2 K)*	*h_k (kW/m²K)*	
		400 s	600 s
Tegel (Fire Brick)	2.3×10^5	0.024	0.020
Keramisk fiberisolering	1.2×10^4	0.006	0.004
Kalcium slikatskiva	1.05×10^5	0.016	0.013

Den totala värmeöverföringskoefficienten beräknas enligt ekvation 5 och eftersom det är olika material i tak och väggar i brandrummet viktas h_k.

Utifrån informationen i Tabell 11-Tabell 14 kan brandgastemperaturen beräknas med hjälp av den framtagna korrelationen.

Tabell 15: Sammanställning av variabler.

Variabel	*Enhet*	*Värde*
$\dot{Q}$	kW	100, 300 och 500
$A_{T,1}$	m^2	29.9
$A_{T,2}$	m^2	134
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	1.64
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	2.20
$h_{k,\,400}$	kW/m^2K	0.0044
$h_{k,\,600}$	kW/m^2K	0.0036

I rapporten från NBS[2] presenteras resultaten från försöken i ett antal diagram som medeltemperaturen över tid i det varma eller kalla lagret i de olika rummen. Ur diagrammen erhålls temperaturerna i Tabell 16.

Tabell 16: Uppskattad temperaturökning i försöken och beräknad temperaturökning.

Försök	*Uppskattad ΔT (K)*		*Beräknad ΔT (K)*	
	400 s	400 s	400 s	600 s
1	55	55	72	76
5	102	102	159	168
8	160	160	230	242

University of Canerbury 2001

I ett examensarbete från Canterbury University presenteras data från ett försök i en större försöksserie[3]. Försöksuppställningen bestod av två ISO rum som vara sammankopplade med en dörröppning. Kortsidan i rum 2 var helt öppen i det försök som presenteras i examensarbetet. I mitten av brandrummet placerades en gasolbrännare med en effekt på 120 kW. Temperaturer mättes bland annat med nio termoelementtråd och ett antal termoelement som vara placerade på tak och golv. Försöket pågick i över en timme för att kunna få stationära förhållanden.

Tabell 17: Dimensionerna på rummen.

Rum	*Bredd (m)*	*Längd (m)*	*Höjd (m)*
Rum 1 (brandrum)	2.4	3.6	2.4
Rum 2	2.4	3.6	2.4

[2] Peacock R.D., Stanford, D., Lee, B.T., An experimental data set for the accuracy assesssment of room fire models, NBSIR 88-3752, National Bureau of Standards, 1988.

[3] Rutherfoord, L., Experimental Results for Pre-Flashover Fire Experiments in Two Adjacent ISO Compartments, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2002.

Tabell 18: Dimensionerna på öppningarna.

Öppningar	*Bredd (m)*	*Höjd (m)*
Rum 1 till rum 2	0.8	2.0
Rum 2 till ut	2.4	2.4

Väggarna bestod av en 12,5 mm tjock gipsskiva (Gib Fyreline) som skyddades av en 10 mm tjock keramisk fiberskiva (Kaowool type 1260).

Eftersom väggarna var relativt tunna och försöket pågick i mer än en timme antas det att stationära förhållanden uppstått. Värmeöverföringskoefficient, h_k, har därför beräknats med ekvation 4 och ekvation 5.

Utifrån den presenterade informationen kan brandgastemperaturen beräknas med hjälp av den framtagna korrelationen.

Tabell 19: Sammanställning av variabler och beräknad temperatur

Variabel	*Enhet*	*Värde*
$\dot{Q}$	kW	120
$A_{T,1}$	m^2	44.48
$A_{T,2}$	m^2	38.72
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	2.26
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	8.92
h_k	kW/m^2K	0.00687
ΔT i rum 2	K	73

I rapporten presenteras medeltemperaturen under försöket (undantaget uppvärmning och avsvalning) för samtliga termoelementtråd. Enligt de värden på termoelement som presenteras förefaller det som om brandgaslagret låg någonstans mellan 0,4 och 0,6 m under taket i rum 2. För att beräkna medeltemperaturen i brandgaslagret i rum två tas medelvärdet av värdena från termoelementen mellan taket och 0,4 m under taket. Medeltemperaturen blir då 105°C. Eftersom någon exakt angivelse av omgivande temperatur inte finns i försöken används 20°C. Temperaturökningen i experimentet var således 85 K.

Brandteknik Lunds Tekniska Högskola 2011

Två enklare fullskaleförsök har genomförts inom projektet. Försöken genomfördes i februari 2011. I försöken varierades effektutvecklingen. I båda försöken användes Heptan som bränsle. I det första försöket (test1) användes ett bål med en diameter på 0,5 m och i det andra försöket (test2) ett bål med diametern 0,8 m. Effektutvecklingen uppskattades genom att beräkna den teoretiska effektutvecklingen med vedertagna metoder[4]. Effektutvecklingen i test1 beräknades till 260 kW och till 930 kW i test2. Temperaturer mätes med ett termoelementtråd i varje rum. Försöken pågick i cirka 12 minuter respektive 8 minuter.

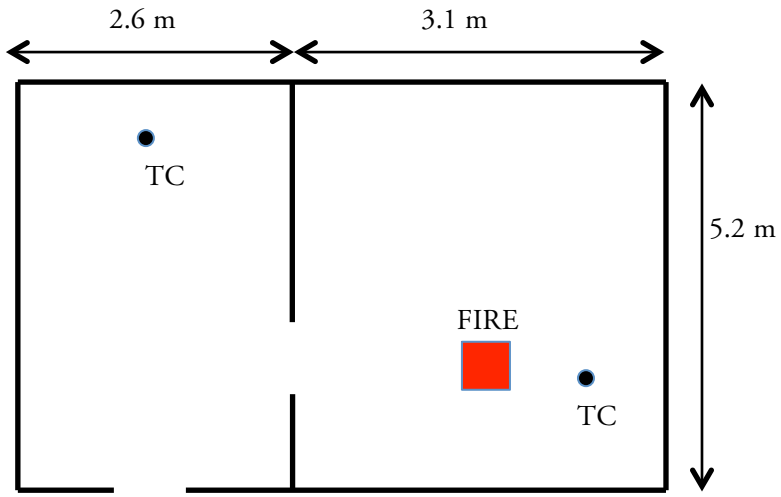
Försöksuppställningen presenteras i Tabell 20 och

[4] Karlsson, B and Quintiere, J G. Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, 1999

Figur 17.

Tabell 20: Dimensioner på rum och öppningar.

Parameter	*Bredd*	*Längd*	*Höjd*
Rum 1 (brandrum)	3.1	5.2	2.5
Rum 2	2.6	5.2	2.5
Öppning mellan rum 1 och 2.	0.9	-	2.0
Öppning mellan rum 2 och ut.	0.9	-	2.0



Figur 17: Schematisk layout av rummen, TC indikerar placering av termoelementträd.

Väggarna var gjorda av Leca block som var putsade invändigt. Golvet och taket var av betong. Eftersom väggar, tak och golv var tjocka relativt hur länge försöket pågick antas det att stationära förhållanden inte uppstod. Värmeöverföringskoefficient, h_k, har därför beräknats med ekvation 3. Eftersom det är olika material i tak och väggar viktas h_k.

Tabell 21: Värmeöverföringskoefficient, h_k,

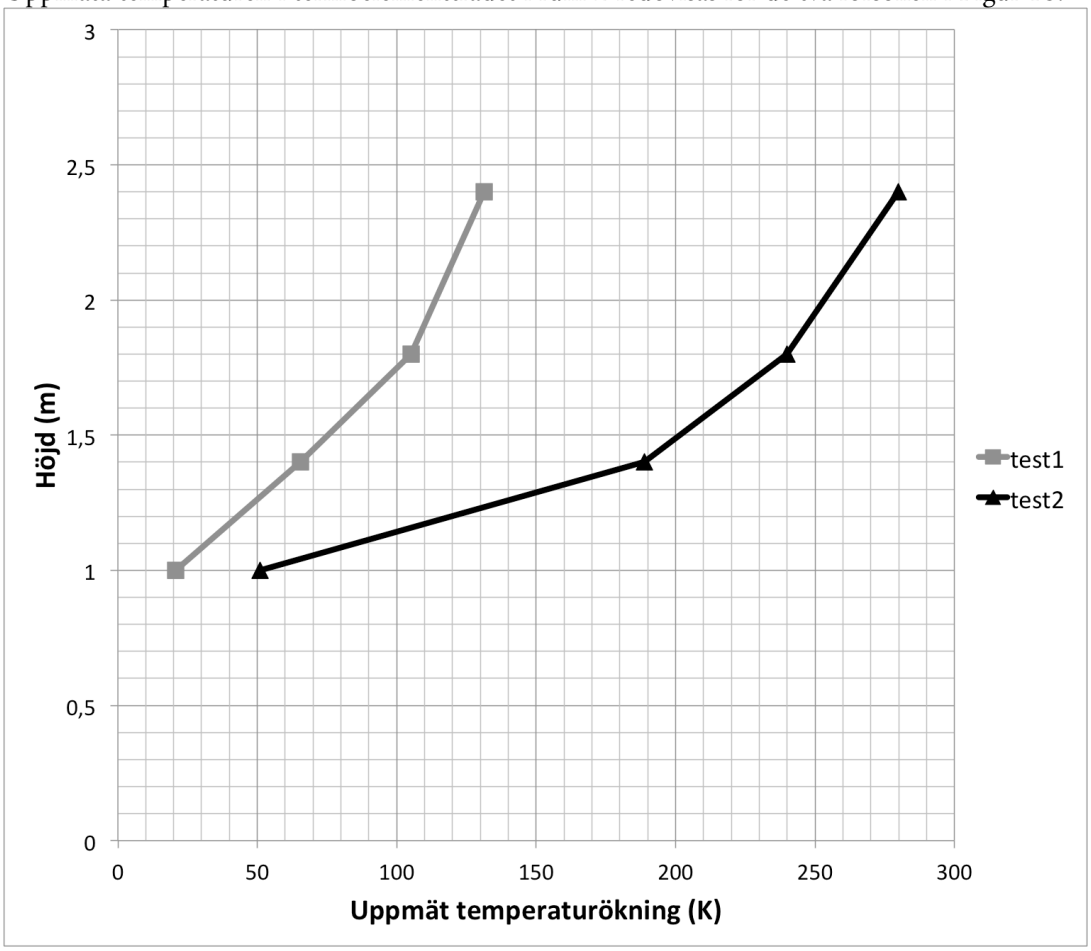
Material	*kρc (J/m² s^1/2 K)*	*h_k (kW/m²K)* 300 s	500 s
Leca block	1.4×10^5	0.021	0.017
Betong	2.0×10^6	0.081	0.063

Utifrån informationen i Tabell 20 och Tabell 21 kan brandgastemperaturen med hjälp av den framtagna korrelationen.

Tabell 22: Sammanställning av variabler.

Variabel	*Enhet*	*Värde*
$\dot{Q}$	kW	260 och 930
$A_{T,1}$	m^2	29.9
$A_{T,2}$	m^2	134
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	1.64
$V_{F,2}$	$m^{5/2}$	2.20
$h_{k,\,300}$	kW/m^2K	0.038
$h_{k,\,500}$	kW/m^2K	0.030

Uppmäta temperaturen i termoelementträdet i rum 2 redovisas för de två försöken i Figur 18.



Figur 18: Uppmätta temperaturer i brandgaslagret i rum2 efter 500 (test1) respektive 300 (test2) sekunder.

Medeltemperaturen i brandgaslagret har uppskattas genom att ta medelvärdet av de fyra termoelementen i varje träd eftersom samtliga befann sig i brandgaslagret. Medeltemperaturökningen vid 500 s i test1 var 82 K och 201 K vid 300 s i test2.

Bilaga B – Värmestrålningsberäkningar

De genomförda värmestrålningsberäkningarna bygger vedertagna metoder. Värmestrålningen till ett objekt kan beräknas med:

$$\dot{q}'' = \sigma T_f^4 \varepsilon F_{1-2}$$

där:
q" = Infallande strålning från flamma till punkt (W/m^2)
σ = Stefan-Boltzmanns konstant (5,67 ×10-8 W/m^{2}K^4)
ε = emissiviteten (-)
F_{12} = Vinkelkoefficient för flamma till punkt (-)

I de genomförda beräkningarna har ingen hänsyn tagits till strålning som absorberas eller reflekteras när den går genom luft. I beräkningarna har emissiviteten satts till 1.

Strålning från en flamma (kap. 3.1)

För att beräkna strålningen från flamman antas den ha formen av en cylinder där flamhöjden beräknas enligt:

$$L = 0.235 Q^{2/5} - 1.02 D$$

där
L = flamhöjd (m)
Q = brandens effektuveckling (kW)
D= pöldiameter (m)

Brandens effektuveckling beräknas med:

$$\dot{Q} = A_f \dot{m}'' \chi \Delta H_c$$

där

A_f = brandens area (m^2)

$\dot{m}''$ = massavbrinning (kg/m^{2}s)
χ = förbränningseffektivitet (-)
ΔH_c = energiinnehåll (kJ/kg)

I beräkningarna används värden för olja (eng. fuel oil, heavy). Tabulerade värden finns i t.ex. Enclosure Fire Dynamics[5]

I beräkningarna antas det att flamman är formad som en cylinder. Vinkelkoefficienten för en cylinder, $F_{12,}$ beräknas med följande utryck (hämtade från FOA handboken[6]):

$$F_{12} = F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

[5] Karlsson, B and Quintiere, J G. Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, 1999.
[6] Försvarets forskningsanstalt. Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor - Metoder för bedömning av risker. Försvarets forskningsanstalt. 1998

$$F_h = \frac{1}{\pi}\left[\tan^{-1}\sqrt{\frac{x_r+1}{x_r-1}} - \frac{x_r^2-1+h_r^2}{\sqrt{AB}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{(x_r-1)A}{(x_r+1)B}}\right]$$

$$F_v = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{x_r}\tan^{-1}\left(\frac{h_r}{\sqrt{x_r^2-1}}\right) + \frac{h_r(A-2x_r)}{x_r\sqrt{AB}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{(x_r-1)A}{(x_r+1)B}} - \frac{h_r}{x_r}\tan^{-1}\sqrt{\frac{x_r-1}{x_r+1}}\right]$$

$$A = (x_r+1)^2 + h_r^2$$

$$B = (x_r-1)^2 + h_r^2$$

$$h_r = h/r$$

$$x_r = x/r$$

där h är höjden på flamman, r är radien och x är avståndet till flammans centrum.

Parameter	Värde	Enhet	Förklaring	Ekv. i EFD
D	3	m	Bränslets diameter	
A_f	7,07	m^2	Horisontell bränslearea	
m"	0,035	kg/m^2s	massavbrinningshastighet	
x	0,7	-	Förbränningseffektivitet	
dH	39,7	kJ/kg	Heat of combustion	
Q	6,83	MW	Effektutveckling	[3.5]
L	4,97	m	Flamhöjd	[4.3]

σ	5,67E-08	W/m^2K^4	Konstant
T	1273	K	Temperatur
emissivitet	1	-	

x	hr	xr	A	B	Fv	Fh	Fmax	Strålning (kW/m2)
2	3,32	1,33	16,44	11,11	0,37	0,31	0,49	72,6
4	3,32	2,67	24,44	13,77	0,18	0,05	0,19	27,7
6	3,32	4,00	35,99	19,99	0,10	0,00	0,10	15,5
10	3,32	6,67	69,77	43,11	0,05	0,00	0,05	6,7
12	3,32	8,00	91,99	59,99	0,03	0,00	0,03	4,8
15	3,32	10,00	131,99	91,99	0,02	0,00	0,02	3,2
18	3,32	12,00	179,99	131,99	0,01	0,00	0,01	2,2
21	3,32	14,00	235,99	179,99	0,01	0,00	0,01	1,6

Parameter	Värde	Enhet	Förklaring	Ekv. i EFD
D	2		Bränslets diameter	
A_f	3,14	m^2	Horisontell bränslearea	
m"	0,033	kg/m^2s	massavbrinningshastighet	
x	0,7	-	Förbränningseffektivitet	
dH	39,7	kJ/kg	Heat of combustion	
Q	2,95	MW	Effektutveckling	[3.5]
L	3,70	m	Flamhöjd	[4.3]

σ	5,67E-08	W/m^2K^4	Konstant
T	1273	K	Temperatur
emissivitet	1	-	

x	hr	xr	A	B	Fv	Fh	Fmax	Strålning (kW/m2)
1,5	3,70	1,50	19,97	13,97	0,33	0,26	0,42	63,1
3	3,70	3,00	29,72	17,72	0,16	0,03	0,16	23,7
5	3,70	5,00	49,72	29,72	0,08	0,00	0,08	11,6
7	3,70	7,00	77,72	49,72	0,04	0,00	0,04	6,6
9	3,70	9,00	113,72	77,72	0,03	0,00	0,03	4,2
12	3,70	12,00	182,72	134,72	0,02	0,00	0,02	2,4
15	3,70	15,00	269,72	209,72	0,01	0,00	0,01	1,6
21	3,70	21,00	497,72	413,72	0,01	0,00	0,01	0,8

Parameter	Värde	Enhet	Förklaring	Ekvation i EFD
D	1		Bränslets diameter	
A_f	0,785398163	m^2	Horisontell bränslearea	
m"	0,028606077	kg/m^2s	massavbrinningshastighet	
x	0,7	-	Förbränningseffektivitet	
dH	39,7	kJ/kg	Heat of combustion	
Q	0,62	MW	Effektutveckling	[3.5]
L	2,06	m	Flamhöjd	[4.3]

σ	5,67E-08	W/m^2K^4	Konstant
T	1273	K	Temperatur
emissivitet	1	-	

x	hr	xr	A	B	Fv	Fh	Fmax	Strålning (kW/m2)
1	4,13	2,00	26,06	18,06	0,25	0,15	0,29	43,5
2	4,13	4,00	42,06	26,06	0,11	0,00	0,11	16,6
4	4,13	8,00	98,06	66,06	0,04	0,00	0,04	5,6
6	4,13	12,00	186,06	138,06	0,02	0,00	0,02	2,7
8	4,13	16,00	306,06	242,06	0,01	0,00	0,01	1,5
10	4,13	20,00	458,06	378,06	0,01	0,00	0,01	1,0
14	4,13	28,00	858,06	746,06	0,00	0,00	0,00	0,5
21	4,13	42,00	1866,06	1698,06	0,00	0,00	0,00	0,2

Parameter	Värde	Enhet	Förklaring	Ekv. EFD
D	0,5		Bränslets diameter	
A_f	0,20	m^2	Horisontell bränslearea	
m"	0,020	kg/m^2s	massavbrinningshastighet	
x	0,7	-	Förbränningseffektivitet	
dH	39,7	kJ/kg	Heat of combustion	
Q	0,11	MW	Effektutveckling	[3.5]
L	1,03	m	Flamhöjd	[4.3]

σ	5,67E-08	W/m^2K^4	Konstant
T	1273	K	Temperatur
emissivitet	1	-	

x	hr	xr	A	B	Fv	Fh	Fmax	Strålning (kW/m2)
0,5	4,11	2,00	25,87	17,87	0,25	0,15	0,29	43,5
2	4,11	8,00	97,87	65,87	0,04	0,00	0,04	5,6
3	4,11	12,00	185,87	137,87	0,02	0,00	0,02	2,7
5	4,11	20,00	457,87	377,87	0,01	0,00	0,01	1,0
7	4,11	28,00	857,87	745,87	0,00	0,00	0,00	0,5
10	4,11	40,00	1697,87	1537,87	0,00	0,00	0,00	0,2
18	4,11	72,00	5345,87	5057,87	0,00	0,00	0,00	0,1
21	4,11	84,00	7241,87	6905,87	0,00	0,00	0,00	0,1

Strålning mellan parallella ytor

I fallet med strålning från en dörr öppning mot ett föremål i ett annat rum används metoden med strålning mellan parallella ytor för att beräkna vinkelkoefficienten. Vilken finns beskriven i bl.a. an Introduction to Fire Dynamics[7]. Resultaten som erhållits med beräkning enligt denna metod återfinns i följande tabeller. I samtliga fall har temperaturen i antagits vara 600°C i dörröppningen en högre medeltemperatur bedöms inte kunna uppstå innan övertändning sker och om övertändning sker kommer brandgaser att förbrännas utanför brandrummet vilket sannolikt innebära att brandspridning sker.

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	2	m
b	Bredd	2	m

c	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
1	2,00	2,00	0,15	0,60	21682	21,7
1,5	1,33	1,33	0,14	0,55	19825	19,8
3	0,67	0,67	0,08	0,33	11814	11,8
4	0,50	0,50	0,06	0,23	8178	8,2
5	0,40	0,40	0,04	0,16	5846	5,8
6	0,33	0,33	0,03	0,12	4332	4,3
7	0,29	0,29	0,02	0,09	3316	3,3
9	0,22	0,22	0,01	0,06	2102	2,1
12	0,17	0,17	0,01	0,03	1221	1,2
15	0,13	0,13	0,01	0,02	794	0,8

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	2	m
b	Bredd	1	m

C	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
0,9	2,22	1,11	0,14	0,56	20125	20,1
1,5	1,33	0,67	0,11	0,44	15857	15,9
2	1,00	0,50	0,08	0,34	12216	12,2
3	0,67	0,33	0,05	0,20	7328	7,3
4	0,50	0,25	0,03	0,13	4698	4,7
5	0,40	0,20	0,02	0,09	3215	3,2
6	0,33	0,17	0,02	0,06	2321	2,3
7	0,29	0,14	0,01	0,05	1747	1,7
8	0,25	0,13	0,01	0,04	1359	1,4
15	0,13	0,07	0,00	0,01	402	0,4

[7] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1998

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	1	m
b	Bredd	1	m

c	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
0,5	2,00	2,00	0,15	0,60	21682	21,7
1	1,00	1,00	0,12	0,47	17054	17,1
1,5	0,67	0,67	0,08	0,33	11814	11,8
2	0,50	0,50	0,06	0,23	8178	8,2
3	0,33	0,33	0,03	0,12	4332	4,3
4	0,25	0,25	0,02	0,07	2610	2,6
5	0,20	0,20	0,01	0,05	1727	1,7
8	0,13	0,13	0,00	0,02	700	0,7
10	0,10	0,10	0,00	0,01	452	0,5
15	0,07	0,07	0,00	0,01	203	0,2

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	0,5	m
b	Bredd	0,5	m

c	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
0,3	1,67	1,67	0,15	0,59	21130	21,1
1	0,50	0,50	0,06	0,23	8178	8,2
1,5	0,33	0,33	0,03	0,12	4332	4,3
2	0,25	0,25	0,02	0,07	2610	2,6
3	0,17	0,17	0,01	0,03	1221	1,2
4	0,13	0,13	0,00	0,02	700	0,7
5	0,10	0,10	0,00	0,01	452	0,5
8	0,06	0,06	0,00	0,00	178	0,2
10	0,05	0,05	0,00	0,00	114	0,1
15	0,03	0,03	0,00	0,00	51	0,1

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	0,2	m
b	Bredd	0,2	m

c	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
0,1	2,00	2,00	0,15	0,60	21682	21,7
0,4	0,50	0,50	0,06	0,23	8178	8,2
0,6	0,33	0,33	0,03	0,12	4332	4,3
1	0,20	0,20	0,01	0,05	1727	1,7
1,5	0,13	0,13	0,01	0,02	794	0,8
1,8	0,11	0,11	0,00	0,02	556	0,6
2	0,10	0,10	0,00	0,01	452	0,5
2,5	0,08	0,08	0,00	0,01	291	0,3
4	0,05	0,05	0,00	0,00	114	0,1
17	0,01	0,01	0,00	0,00	6	0,0

	Förklaring	Värde	enhet
a	Höjd	0,1	m
b	Bredd	0,1	m

c	X	Y	θ	4 θ	Strålning (kW/m2)	Strålning (kW/m2)
0,05	2,00	2,00	0,15	0,60	21682	21,7
0,4	0,25	0,25	0,02	0,07	2610	2,6
0,6	0,17	0,17	0,01	0,03	1221	1,2
0,8	0,13	0,13	0,00	0,02	700	0,7
1	0,10	0,10	0,00	0,01	452	0,5
1,2	0,08	0,08	0,00	0,01	315	0,3
1,5	0,07	0,07	0,00	0,01	203	0,2
2	0,05	0,05	0,00	0,00	114	0,1
3	0,03	0,03	0,00	0,00	51	0,1
17	0,01	0,01	0,00	0,00	2	0,0

Bilaga C – Värmeledningsberäkningar

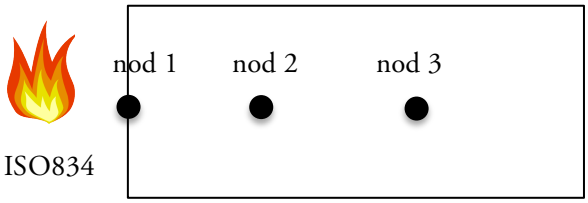
Värmeledningsberäkningarna bygger på en metodik som presenteras i SFPE handboken[8] och presenteras därför enbart kortfattat här. Resultaten av beräkningarna återfinns i kap. 4.

ISO834 beskrivs med följande utryck:

$$T = 345log_{10}(8t + 1) + T_0$$

där:
t = tiden i minuter
T_0 = omgivande temperatur

Vägen delas upp i olika noder och temperaturen beräknas för varje nod med hjälp av information om temperaturen i föregående nod i samma tidssteg och efterliggande nod i föregående tidssteg.



Temperaturen i nod 1 beräknas med:

$$T_1' = \left(\frac{h_{varm}(T_f - T_1) - k(T_1 - T_2)/dx}{dx}\right)\frac{dt}{\rho c} + T_1$$

där:
T_i' = temperaturen i nod 1 efter ett tidssteg
h_{varm}= värmeöverföringstalet på varm sida (W/m^{2}K).
T_f= temperaturen på luften på brandutsatt sida.
T_1 = temperaturen i nod 1 i föregående tidssteg.
T_2 = temperaturen i nod 2 i föregående tidssteg.
k = värmeledningstal (W/mK).
dx = avstånd mellan noder (m).
dt = tidssteg (s).
ρ = densiteten på materialet (kg/m^3)
c = specifik värmekapacitet

Temperaturen i resterande noder beräknas med:

$$T_i' = \frac{k(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1})}{dx^2}\frac{dt}{\rho c} + T_1$$

där:
T_i'= temperaturen i nod i efter ett tidssteg.
T_i = temperaturen i nod i i föregående tidssteg.
T_{i+1} = temperaturen i nod i+1 i föregående tidssteg.
T_{i-1} = temperaturen i nod i-1 i föregående tidssteg.

I beräkningarna har ett tidssteg på 30 sekunder använts och ett avstånd mellan noder på 0,025 m.

[8] Rockett, J. A., Milke, J. A., Conduction of Heat in Solids. Chapter 1-2, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth edition. National Fire Protection Association, Quincy. 2008