

# Brandgasspridning inom en brandcell

*Nils Johansson*

---

Avdelningen för brandteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
Lunds Universitet

Rapport 3194, Lund 2015

# Brandgasspridning inom en brandcell

Nils Johansson

Lund 2015

Brandgasspridning inom en brandcell  
Smoke spread within a fire compartment

Nils Johansson

**Rapport 3194**  
**ISSN: 1402-3504**  
**ISRN: LUTVDG/TVBB--3194--SE**

Antal sidor: 33  
Illustrationer: Nils Johansson

Sökord:  
Braddynamik, fler-rumslägenheter, numeriska experiment, handberäkningsmetoder,  
reproducerbarhet

Keywords:  
Fire dynamics, multi-room compartment, numerical experiment, hand-calculation methods,  
reproducibility

**Abstract:**

The topic of this report is smoke spread within fire compartments. A study of the reproducibility of full-scale compartment fire experiments is presented and it is shown that the reproducibility of the temperature measurements ranged between  $\pm 10$  and 35 % (95 % confidence interval around the mean). Furthermore, two hand-calculation methods that can be used to calculate conditions in rooms adjacent to the room of fire origin are presented and validated in this work. The first method is an empirical correlation based on data from a numerical experiment. The correlation has been shown to give estimates of the temperature in a room adjacent to a fire room within 10 % of experimentally measured values. The second method is based on a mass and energy balance and it can be used to calculate the hot gas layer height and temperature. An evaluation of numerical experiments as a research method in fire safety science is also presented in this report.

© Copyright: Avdelningen för brandteknik, Lunds Universitet  
Lund 2015.

---

Avdelningen för brandteknik  
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

Division of Fire Safety Engineering  
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 utgör slutrapporteringen i forskningsprojektet "Rumsgeometrins påverkan på brandgasspridning inom en brandcell", och stora delar av arbetet är baserat på författarens doktorsavhandling: "Fire Dynamics in Multi-Room Compartments".

Ett särskilt tack riktas Michael Strömgren, SP Fire Research och Tommy Magnusson, Vattenfall, för diskussioner i uppstartsfasen av projektet. Ett tack riktas även till kollegorna, Patrick van Hees, Stefan Svensson och Jonathan Wahlqvist, på avdelningen för brandteknik, vid Lunds Tekniska Högskola som varit delaktig i arbete med flera av de publikationer som genomförts i anslutning till projektet.

Projektet är finansierat av BRANDFORSK (BF 313-141), Styrelsen för svensk brandforskning.

Lund, 1 oktober 2015.

Nils Johansson

## Sammanfattning

Det är tämligen välkänt hur en brand utvecklas i ett rum och det finns flera enkla handberäkningsmetoder som kan användas för att beräkna t.ex. temperaturen i ett rum vid brand. För att studera förhållande utanför brandrummet krävs det dock att numeriska metoder, som genomförs med datormodeller, används. Dessa datormodeller kan, i de flesta fall, göra bra förutsägelser av faktorer som är betydelsefulla för brandsäkerheten i en byggnad och de utgör därför viktiga verktyg vid brandtekniska analyser. När en datormodell används kan det dock vara så att information undanhålls för användaren eftersom modellen är komplex och det kan vara svårt för användaren att överblicka själva beräkningsprocessen. Det kan leda till att insynen i beräkningarna blir begränsad och det är därför viktigt att användaren har en förståelse för den underliggande branddynamiken i det studerade problemet. Det kan även vara tidskrävande att genomföra beräkningar med dessa datormodeller eftersom det kan ta flera dagar att få ett resultat. Enkla och transparenta handberäkningsmetoder kan däremot skapa möjligheter för att förstå grunderna kring komplexa brandfenomen. Handberäkningsmetoder har i regel en lägre noggrannhet än datormodeller, men kan ge ett ungefärligt svar som i många fall kan vara tillfredsställande för att förstå vilka variabler som är mest inflytelserika och därmed viktiga att bestämma inför en mer tidskrävande beräkning. De kan även användas för att genomföra överslagsberäkningar för avgöra om det, för ett specifikt problem, behövs en mer detaljerad och tidskrävande analys. Olika typer av handberäkningsmetoder är därför ett bra komplement till de mer avancerade datormodellerna.

I detta projekt har brandgasspridning inom en brandcell studerats. Rumsbränder är komplexa och komplexiteten ökar om brandgasspridning sker till flera rum. När det gäller brandtekniska experiment är det ofta svårt att styra alla variabler som påverkar resultatet och det innebär att resultatet kan variera mycket mellan reproducerade tester. Dessutom genomförs ofta bara enskilda experimentella tester med inga eller få upprepningar, det innebär att kunskapen om den variation mellan tester som kan förekomma blir begränsad. I projektet har därför en studie av reproducerbarheten av förhållanden vid brand i en tre-rumslägenhet studerats. Reproducerbarheten av temperaturmätningarna varierade mellan  $\pm 10$  och  $35$  % (95 % konfidensintervall runt medelvärdet) och berodde på närheten till branden, tid efter antändning och ventilationsförhållande.

En stor del av arbetet i projektet har gått ut på att utveckla och utvärdera metoder som kan användas för att beräkna förhållande i rum som angränsar brandrummet. Två nya sådana handberäkningsmetoder presenteras i denna rapport. Båda metoderna har validerats mot ett experiment i liten skala (modell-skala) som även det genomförts inom projektet. Den första metoden är en empirisk korrelation som är baserad på data från ett numeriskt experiment. Korrelationen har visats kunnat användas för att uppskatta temperaturen i ett rum angränsande till ett brandrum inom 10 % från experimentellt uppmätta värdena. Den andra metoden bygger på en mass- och energibalans och den fungerar som en enkel två-zonsmodell och kan användas för att beräkna brandgaslagrets höjd och temperatur.

En utvärdering av numeriska experiment som en forskningsmetod inom brandteknik har också genomförts i projektet. Det anses vara en lovande metod, men som är förknippad med både för- och nackdelar jämfört med traditionella experiment. Numeriska experiment och traditionella fullskaleförsök anses komplettera varandra väl eftersom ingen experimentell metod kan rekommenderas generellt för alla tänkbara situationer inom brandteknisk forskning.

## Summary

It is rather well known how fire develops in a room, and there are several simple hand-calculation methods available that can be used to calculate e.g. the temperature in a fire room. To study the conditions outside the room of fire origin, however, requires numerical methods implemented by computer models. Such models can, in most cases, make good predictions of factors that are important for fire safety in buildings and these models are consequently important tools in fire safety engineering. When a computer model is used, it may be that information is being kept from the user because the model is complex and it may be difficult for the user to follow the calculation procedure. This can result in that the transparency of the model is limited; therefore, it is important that the user has an understanding of the fundamental fire dynamics of the studied problem. Simple and transparent alternative calculation methods can, however, create opportunities to understand the basics of complex fire phenomenon. Hand-calculation methods generally do have a lower accuracy than the computer models, but can give an approximate answer that is satisfactory in order to understand which variables are most influential. Hand-calculation methods can also be used to perform rough calculations for determining whether it, for a specific problem, a more detailed and time-consuming analysis is needed. Various types of hand-calculation methods are therefore good complements to the more advanced computer models.

In this project, smoke spread within fire compartments are studied. Fires in rooms are complex, and the complexity increases if the smoke spreads to several rooms. When it comes to experiments in fire science research, it is often difficult to control all the variables that affect the result and it means that the results can vary widely between reproduced tests. Moreover, often are just individual experimental tests with no or few repetitions preformed, and this means that the knowledge of the variation between tests that may occur are limited. Therefore, a study of the reproducibility of the fire conditions in a three-room apartment was preformed in the project. The reproducibility of the temperature measurements ranged between  $\pm 10$  and 35 % (95 % confidence interval around the mean). The variation depended on the proximity to the fire, time after ignition and the ventilation conditions.

Two different hand-calculation methods that can be used to calculate conditions in rooms adjacent to the room of fire origin are presented in the report. Both methods are validated with data from a small-scale experiment, which has been carried out within the project. The first method is an empirical correlation based on data from a numerical experiment. The correlation has been shown to give estimates of the temperature in a room adjacent to a fire room within 10 % of experimentally measured values. The second method is based on a mass and energy balance, and it performs as a simple two-zone model and can be used to calculate the hot gas layer height and temperature.

An evaluation of numerical experiments as a research method in fire safety science has been performed in the project. Numerical experimentation is considered to be a promising method, but it is associated with both advantages and challenges compared to traditional experiments. However, numerical experiments and traditional full-scale experiments are considered to complement each other well because no experimental method can be generally recommended for all situations in fire research.

## Symboler

|             |                                                                |
|-------------|----------------------------------------------------------------|
| $A_O$       | Öppningsarea ( $\text{m}^2$ )                                  |
| $A_T$       | Total omslutande yta minus öppningar ( $\text{m}^2$ )          |
| $A_w$       | Total omslutande yta i kontakt med brandgaser ( $\text{m}^2$ ) |
| $C_d$       | Flödes coefficient (-)                                         |
| $c_p$       | Värmekapacitet ( $\text{kJ}/(\text{kg K})$ )                   |
| $D_f$       | Diametern på branden (m)                                       |
| $D$         | Dimensionslös höjd $H_D/H_O$ (-)                               |
| $d$         | Tjocklek (m)                                                   |
| $g$         | Gravitationskonstant ( $\text{m/s}^2$ )                        |
| $H$         | Rumshöjd (m)                                                   |
| $H_O$       | Öppningshöjd (m)                                               |
| $H_N$       | Höjd till neutrallagret (m)                                    |
| $H_D$       | Höjd till brandgaslagret (m), se även $z_{int}$                |
| $h$         | Värmeövergångskoefficient ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )           |
| $h_k$       | Värmeövergångskoefficient ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )           |
| $k$         | Konduktivitet ( $\text{W/m K}$ )                               |
| $L$         | Flamhöjd (m)                                                   |
| $l$         | Rumslängd (m)                                                  |
| $\dot{m}_a$ | Massflöde omgivande luft ( $\text{kg/s}$ )                     |
| $\dot{m}_f$ | Massflöde bränsle ( $\text{kg/s}$ )                            |
| $\dot{m}_g$ | Massflöde varma gaser ( $\text{kg/s}$ )                        |
| $\dot{m}_p$ | Plymmassflöde ( $\text{kg/s}$ )                                |
| $N$         | Dimensionslöshöjd, $H_N/H_O$ (-)                               |
| $\dot{Q}$   | Effektutveckling, HRR ( $\text{kW}$ )                          |
| $\dot{Q}_c$ | Konvektiv del av effektutvecklingen ( $\text{kW}$ )            |
| $T_a$       | Temperatur på omgivande luft (K)                               |
| $T_g$       | Temperatur på brandgaser (K)                                   |
| $t$         | Tid (s)                                                        |
| $W$         | Bredd på öppning (m)                                           |
| $w$         | Bredd på rum (m)                                               |
| $z$         | Höjd över golv (m)                                             |
| $z_{int}$   | Höjd till brandgaslager (m), se även $H_D$                     |

### *Grekisk*

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| $\beta$            | Riktigheten av modellberäkningen (-)                    |
| $\varepsilon$      | Emissivitet (-)                                         |
| $\rho$             | Densitet ( $\text{kg/m}^3$ )                            |
| $\sigma$           | Stefan-Boltzmanns konstant ( $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ) |
| $\tilde{\sigma}_M$ | Precisionen av modellberäkningen (-)                    |
| $\chi_r$           | Strålningsandel (-)                                     |

## *Index*

- <sup>1</sup>      Egenskap i brandrummet
- <sup>2</sup>      Egenskap i angränsande rum
- <sup>a</sup>      Egenskap hos omgivande luft
- <sup>g</sup>      Egenskap hos brandgaser



# Innehållsförteckning

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduktion.....                                                                  | 1  |
| 1.1   | Problembeskrivning .....                                                           | 2  |
| 1.2   | Syfte och mål .....                                                                | 3  |
| 1.3   | Publikationer inom projektet.....                                                  | 3  |
| 2     | Reproducerbarhet av brand i trerumslägenhet .....                                  | 4  |
| 2.1   | Bakgrund.....                                                                      | 4  |
| 2.2   | Metod .....                                                                        | 4  |
| 2.3   | Avgränsningar.....                                                                 | 5  |
| 2.4   | Resultat .....                                                                     | 5  |
| 2.5   | Slutsats .....                                                                     | 6  |
| 3     | Numeriska experiment.....                                                          | 7  |
| 3.1   | Bakgrund.....                                                                      | 7  |
| 3.2   | Resultat .....                                                                     | 7  |
| 3.2.1 | Fördelar och utmaningar med numeriska experiment.....                              | 7  |
| 3.2.2 | Tillämpning.....                                                                   | 8  |
| 4     | Förenklad metod att beräkna brandgaslagrets höjd.....                              | 11 |
| 4.1   | Bakgrund.....                                                                      | 11 |
| 4.2   | Metod .....                                                                        | 11 |
| 4.3   | Resultat .....                                                                     | 11 |
| 4.4   | Slutsatser .....                                                                   | 12 |
| 5     | Utvärdering av metoder för brand i en fler-rumslägenhet .....                      | 13 |
| 5.1   | Bakgrund.....                                                                      | 13 |
| 5.2   | Metod .....                                                                        | 13 |
| 5.3   | Slutsatser .....                                                                   | 15 |
| 6     | Övriga relaterade publikationer .....                                              | 16 |
| 6.1   | Fire Dynamics in multi-room compartment fires .....                                | 16 |
| 6.2   | Radiative heat flux in a pre-flashover compartment fire .....                      | 16 |
| 7     | Slutsats .....                                                                     | 17 |
| 8     | Fortsatt arbete.....                                                               | 18 |
| 9     | Referenser .....                                                                   | 19 |
|       | Bilaga A – Beräkning av brandgaslagret höjd och temperatur i närliggande rum ..... | 22 |

# 1 Introduktion

I Sverige har det funnits brandskyddsbestämmelserna på stadsnivå sedan 1300-talet. I dessa reglerades det hur staden skulle delas upp i kvarter med tillräckligt breda gator och gränder för att förhindra brandspridning till nästa kvarter. Trots detta inträffade flera stora bränder under 1700 och 1800-talen där hela städer brann upp. Byggnader kom senare att uppföras med brandmurar för att förhindra brandspridning mellan dem. Under 1900-talet kom nationella krav på att en byggnad skulle delas upp i brandceller för att begränsa branden och brandgaserna till en del av en byggnad.

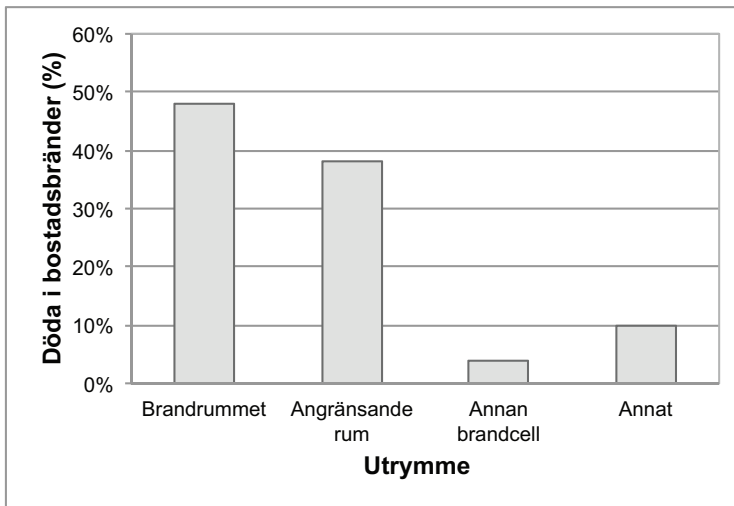
En brandcell kan bestå av ett eller flera rum. Spridningen av brand och brandgaser begränsas i brandcellen genom krav på ytskikt (tak, väggar och golv) med det s.k. Euroclass systemet i de svenska byggreglerna [1]. I andra länder, som t.ex. Storbritannien, finns det också regler på möbler och inredning [2], som innehåller krav på antändningsmotstånd av fyllnadsmaterial och möbelklädsel. Men det finns andra faktorer än inredningen och ytskikten som påverkar spridningen av brand och brandgaser i en byggnad. En sådan faktor är geometrin hos utrymmet, t.ex. area, takhöjd och öppningar mellan olika rum. I allmänhet tas ingen hänsyn till hur brandcellens geometri, antal rum och icke-brandklassade konstruktionselement påverka brand- och brandgasspridningen inom en brandcell. Inom kärnkraftsindustrin är det dock möjligt att beakta inverkan av sådana faktorer.

Begreppen "Fire Compartment" och "Fire Cell" används inom kärnkraftsindustrin [3], där "Fire Compartment" avser vad som normalt betraktas som en brandcell, d.v.s. brandseparation enligt en viss klassificering. "Fire Cell" är ett begrepp som kan användas där det inte är möjligt att fastställa en konventionell brandseparation för att t.ex. separera ett säkerhetssystem och dess redundanta del. En "Fire Cell" kan bestå av ett område i ett rum, ett rum eller flera rum, och en brandcell kan bestå av flera "Fire Cells". "Fire Cell" kan, enligt en säkerhetsguide från det internationella atomenergiorganet (IAEA) [3], upprättas genom att:

- Minimera brandbelastning.
- Separation genom ett säkerhetsavstånd
- Passiva åtgärder såsom brandsäkra väggar.
- Aktiva system, såsom sprinklersystem.
- En kombination av aktiva och passiva åtgärder

Det är möjligt att placera ett säkerhetssystem och dess redundanta del i olika rum, men i samma brandcell, så länge som en analys kan visa att tillräckliga åtgärder vidtas för att undvika att systemet slås ut [3].

Rekommendationer för hur brandceller kan delas upp i mindre delar för att begränsa spridningen av brandgaser i en brandcell kan användas i andra industriapplikationer utanför kärnkraftsindustrin, och även i bostadshus. Omkring 38 % av omkomna i flerbostadshus i Sverige återfinns i rum som angränsar startutrymmet för branden (se figur 3). Om layout och geometrin i fler-rumslägenheter utformas så att det finns ett inbyggt brandskyddssystem, kan det vara möjligt att öka tiden till att kritiska förhållanden uppstår vid brand i lägenheten. Ett sådant säkerhetssystem skulle vara mer robust än krav på väggbeklädnader och inredning eftersom det är svårare för de boende att flytta väggar och dörrkarmar jämfört med att byta ytskikt och möbler.



**Figur 1: Plats där omkomna påträffats vid bränder i svenska flerbostadshus 2005-2013 baserade på data från Myndigheten för samhällsskydd och beredskap [4]. Kategorin "Annat" omfattar kategorierna "okänd", "utanför byggnaden" och "uppgift saknas".**

## 1.1 Problembeskrivning

Det finns inga särskilda rekommendationer eller riktlinjer i Sverige idag för hur fler-rumslägenheter kan konstrueras för att minska spridningen av brandgaser mellan rummen. Det finns dock vägledningar kring detta i andra länder. I Storbritannien finns det rekommendationer att lägenheter utrustas med en så kallad skyddad ingång med syftet att hålla hallen relativt rökfri i ett tidigt skede av en brand i ett angränsande rum så att personer i lägenheten kan utrymma lättare. Alla rum i lägenheten ska anslutas till hallen med en dörr som har en brandklass på 30 minuter [5].

Befintlig forskning kring rumsbränder fokuserar främst på startutrymmet för branden och den vetenskapliga teorin kring rumsbränder är fokuserad på ett enstaka rum. Det finns, naturligtvis, exempel på experimentella studier där fler-rumslägenheter förekommit. Audouin [6] har genomfört en litteraturstudie och sammanfattade tio brandexperiment där fler-rumslägenheter studerats. Men även Heskestads och Hill [7], Nakaya et al. [8] and och Rockett, Morita och Cooper [9] har studerat brand i fler-rumslägenheter. En fler-rumskonfiguration användes även i PRISME-projektet [10] där värme och brandgasspridning genom dörrar och studerades.

Det finns flera teoretiska modeller och metoder tillgängliga för att studera förhållandena i det rum där branden startade [11]. Det saknas dock enkla ingenjörsmetoder som kan användas för att beskriva förhållandena i rum angränsande till brandrummet. Detta innebär att förhållandena i sådana utrymmen måste studeras med två-zons modeller eller Computational Fluid Dynamics (CFD) modeller. Sådana avancerade datormodeller är i allmänhet bra verktyg för brandtekniska beräkningar, och de gör det möjligt att t.ex. uppskatta brandgaslagrets temperatur och höjd i fler-rumsgeometrier. Trots detta finns det fortfarande ett behov av enkla handberäkningsmetoder för flera skäl.

Occams rakkniv är en allmän princip inom forskning och innebär att man ska sträva efter att ge den enklaste formen av förklaring till en viss företeelse [12]. Mer detaljer kan inkluderas i många modeller inom brandtekniken, men det är inte säkert att den ökade graden av komplexitet kommer att vara rimlig med hänsyn till den ökande noggrannhet eller syftet med modellen. Inom konstruktionsteknik [13], har det hävdats att den konceptuella förståelsen av ett problem kan påverkas negativt av användning av avancerad programvara. Sådana program kan innebära dolda processer eller så kallade "black box" effekter som begränsar informationen till användare och användarens kontroll av beräkningsprocessen. Följaktligen kan resultatet bli att förståelse av den studerade problemet hämmas. Lamb [14] anger att förståelsen av det förväntade strukturella beteendet hos enskild komponent är en viktig del vid beräkningar av konstruktioner och samma argumentation kan föras inom brandteknik d.v.s. det är viktigt att förstå grundläggande

branddynamik för att kunna modellera hur brandgaser sprids inom en byggnad. Enkla och transparenta metoder anses vara värdefulla verktyg för att förstå grunderna i komplexa branddynamiska problem, eftersom sådana modeller innefattar de viktigaste variablerna som styr den studerade fenomenet.

Ett annat skäl som motiverar användningen av enkla och transparenta handberäkningsmetoder är möjligheten för ingenjörer att använda metoderna för att göra uppskattningar i samband med en brandteknisk projektering. Enklare metoder kan ha en lägre noggrannhet jämfört med mer avancerade datormodeller, men enkla metoder kan många gånger ge uppskattningar som kan vara tillfredsställande för den studerade problemet. Denna typ av uppskattningar kan också användas för att avgöra om det behövs mer detaljerade och tidskrävande beräkning. Dessutom kan en enkel metod ofta ge ett svar direkt medan en CFD simulering kan behöva timmar eller dagar för att ge ett resultat. Detta innebär även att enkla metoder gör det möjligt att göra brandriskanalyser, t.ex. Monte Carlo analyser där hundratals eller tusentals olika scenarier studeras, vilket inte är möjligt med en CFD-modell.

Slutligen kan enkla metoder användas i parametriska studier för att öka kunskapen om de faktorer som bestämmer villkoren i en rumsbrand. Det skulle kunna skapa möjligheter att utveckla rekommendationer och riktlinjer för hur rum i en brandcell bör planeras för att minska konsekvenserna av en brand. Som tidigare nämnts, kan ett robust brandskydd på så sätt byggas in i byggnaden.

Det finns alltså flera skäl till att utforska området med brand i fler-rumslägenheter.

## 1.2 Syfte och mål

Projektets ursprungliga syfte var att ta fram kunskap om hur vissa rumsgeometrier påverkar brandgasspridning inom en brandcell och undersöka om det finns geometrier som medför allvarigare konsekvenser i olika typer av objekt. Målet var att tillämpa denna kunskap för att förbättra brandskyddet inom samma brandcell genom att undvika vissa typer av geometrier och lösningar i t.ex. lägenheter eller industrier.

Under projektets gång har dock fokus ändrats och förskjutits mot den problembeskrivning som ges i avsnitt 1.1. Det vill säga att syftet blev att studera brandgasspridning i en fler-rumslägenhet.

Det övergripande målet med föreliggande rapport är att redogöra för det arbete som gjorts inom ramen för projektet.

## 1.3 Publikationer inom projektet

I kapitel 2-5 presenteras en sammanfattning av de olika insatser som gjorts inom projektet. Dessa resultat är i samtliga fall tidigare redovisade i följande vetenskapliga publikationer:

- "A study of reproducibility of a full-scale multi-room compartment fire experiment" [15] publicerad i *Fire Technology*.
- "Numerical experiments and compartment fires" [16] publicerad i *Fire Sciences Reviews*.
- "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire" [17] publicerad i *Fire and Materials*.
- "A simplified relation between hot layer Height and opening mass flow" [18] presenterad på konferensen *11th International Symposium on Fire Safety Science*.
- "An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires" [19] publicerad i *Fire Safety Journal*.
- Doktorsavhandlingen "Fire dynamics of multi-room compartment fires" [20]
- "Radiative heat flux in a pre-flashover compartment fire" [21] presenterad på konferensen *2nd European Symposium on Fire Safety Science*.

## 2 Reproducerbarhet av brand i trerumslägenhet

Inom ramen för projektet har en studie av reproducerbarheten av ett antal olika brandförsök i en trerumslägenhet genomförts. Studien är presenterad i artikeln ”A study of reproducibility of a full-scale multi-room compartment fire experiment” [15] som har publicerats i *Fire Technology*.

### 2.1 Bakgrund

Det finns många publikationer som redovisar data från brandtekniska experiment. Brandtekniska experiment i verklig skala är ofta rigorösa och kostsamma, dessutom utförs ofta endast enstaka försök med få eller inga repetitioner. Därför kan det vara svårt att hitta väldokumenterade brandtekniska experiment som kan användas för t.ex. validering av brandmodeller [22,23]. I andra fall kan den experimentella uppställningen vara alltför komplex, t.ex. när brandspridning mellan olika objekt ingår [3], för att kunna modelleras med de modeller som finns tillgängliga.

För att kunna använda data från ett tidigare brandtekniskt experiment för t.ex. validering av datormodeller är det ofta nödvändigt att först genomföra en bedömning av osäkerheter förknippade med experimenten. Men det kan vara svårt om inte all information finns tillgänglig i rapporteringen av experimentet. Detta kan vara information om väder- och ventilationsförhållanden eller hinder utanför experimentuppställning som kan påverka flödet av luft och brandgaser. Om man tror att sådana parametrar kan ha ett stort inflytande är därför viktigt att information om dem redovisas. Det är dock omöjligt att kontrollera alla omgivande faktorer i ett brandtekniskt experiment och det kommer att finnas variationer mellan olika tester med samma experimentella uppställning. En sådan variation kan illustreras med studier av repeterbarhet eller reproducerbarhet av testet. Det finns emellertid sällan sådan information tillgänglig för många av de brandtekniska experiment som tidigare redovisats [22].

Repeterbarheten av mätresultat är en beskrivning av variationen i resultatet mellan olika tester som är utförda under samma förhållanden. När variationen mellan mätningarna är mindre än en viss bestämd gräns, kan mätningarna sägas vara repeterbara. Reproducerbarhet är en beskrivning av variationen mellan tester av samma experimentella uppställning men under något skilda omständigheter, det kan t.ex. vara i olika laboratorier eller under förändrade väderförhållande. Om repeterbarhet testas, måste samma mätmetod, observatör, instrument och plats användas. Upprepningen måste också äga rum under en kort tidsperiod. När dessa villkor förändras mellan mätningarna är det möjligt att testa reproducerbarhet. Både repeterbarhet och reproducerbarhet kan uttryckas som spridning i resultatet [24]. Detta innebär att reproducerbarhet och repeterbarhet är sätt att beskriva precisionen i mätningarna.

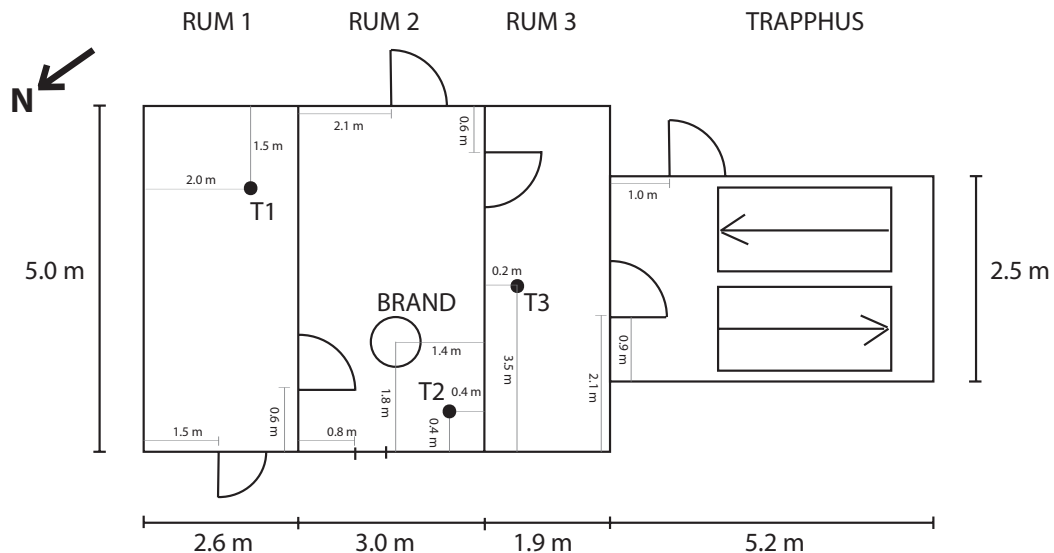
Standardiserade brandtekniska tester utförs i regel i miljöer där olika parametrar som kan påverka testet kan kontrolleras för att på så sätt få en god reproducerbarhet och repeterbarhet. Studier av reproducerbarhet och repeterbarhet av brandtekniska tester har tidigare utförts i flera sammanhang (t.ex. i [25,26]) och det har även skett i samarbete mellan olika laboratorier, som t.ex. det arbete som Janssens presenterat [27]. Variation i resultaten mellan olika tester beror på den experimentuppställning och de uppmätta egenskaperna. Studien av Janssens och även andra tidigare studier av reproducerbarhet och repeterbarhet av brandtekniska tester har begränsats till standardiserade tester eller brandförsök i enstaka rum. Detta innebär att det finns en brist på studier av reproducerbarhet för bränder och brandgasspridning i flerrumslägenheter.

Syftet med denna del av projektet har därför varit att kvantifiera reproducerbarhet av ett brandtekniskt test i en trerumslägenhet för att illustrera den möjliga variation som kan förväntas i denna typ av experiment. De experimentella data som användes var uppmätta vid laborationer i en kurs i branddynamik (kurskod: VBRF10) vid Lunds Tekniska Högskola.

### 2.2 Metod

Trerumslägenheten var belägen på andra våningen i ett tre våningars hyreshus som används för utbildning och övning vid MSB:s skola i Revinge. Data från totalt 45 olika brandtekniska tester,

som representerade fyra olika ventilationsscenarier ingick i studien. Branden utgjordes av ett kärl ( $\varnothing = 800 \text{ mm}$ ) fyllt med heptan som placerades på en lastcell centralt i det mellersta rummet i lägenheten (se Figur 2). Temperaturmätningar gjordes med termoelement på fyra platser i varje rum (markering T1-T3 i Figur 2) och i trapphuset, bränslet vägdes kontinuerligt. Väderförhållandena vid varje testtillfälle erhålls från SMHI. En detaljerad beskrivning av den experimentuppställningen ges i artikeln. Deskriptiv statistik och s.k. funktionsanalys (eng. functional analysis [28]) användes för att analysera data och på så sätt beskriva reproducerbarheten.



**Figur 2: Planlösning för tre-rumslägenheten. Branden placerades i mitten rummet (rum 2). Bilden är återskapad utifrån en bild i den aktuella artikeln [15].**

## 2.3 Avgränsningar

De brandtekniska testerna utfördes ursprungligen som laborationer i kursen i branddynamik vid Lunds Universitet och syftet med testerna var ursprungligen pedagogiskt, vilket innebär att testerna inte var planerade och genomförda som ett experiment. Arbetet ses därför som en observationell studie eftersom det inte varit möjligt att i denna studie påverka testuppställningen.

Testerna genomfördes under tre dagar i februari under en 6-årsperiod och flera påverkande variabel har sannolikt ändrats mellan de olika testerna. Väderförhållandena (dvs. vindhastighet, vindriktning och luftfuktighet) växlade mellan de olika tester och den exakta placeringen av olika mätutrustning varierade något mellan de olika åren. På grund av dessa kända variationer, kan det inte hävdas att repeterbarheten studeras, för då är det nödvändigt att förhållanden är de samma under samtliga test (d.v.s. instrumentation, plats och observatör är de samma [24]). Termen reproducerbarhet används därför istället.

## 2.4 Resultat

De uppmätta temperaturerna (95 % konfidensintervall) i den övre delen av de angränsande rummen var i intervallet  $\pm 7\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$  runt medeltemperaturen beroende på scenario. Temperaturvariationen i brandrummet var i genomsnitt något högre. Det framkom också att ventilationsförhållanden påverkade reproducerbarhet, och i fall med begränsad ventilation var variationen var större. Det uppmätta temperaturintervallet (95 % konfidensintervall) i den övre delen av de tre rummen presenteras i Tabell 1.

**Tabell 1: 95 % konfidensintervall ( $\pm\%$  runt medeltemperatur) observerat vid 60 och 240 sekunder.**

|          | Scenario 1<br>(10 tester) | Scenario 2<br>(8 tester) | Scenario 3<br>(15 tester) | Scenario 4<br>(12 tester) |
|----------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Rum 1    | 21 / 18                   | 14 / 13                  | 16 / 18                   | 35 / 20                   |
| Brandrum | 26 / 19                   | 17 / 22                  | 18 / 33                   | 11 / 10                   |
| Rum 3    | 22 / 12                   | 11 / 7                   | 21 / 14                   | 21 / 15                   |

I funktionsanalysen användes mått på den genomsnittliga temperaturskillnaden (ERD), överensstämmelsen mellan formen på de enskilda temperatur-tid kurvorna och medelvärdet (SC), samt förskjutningen mellan medelvärdet och en de enskilda kurvorna (EPC). ERD i brandrummet var högre än i angränsande rum, med undantag för scenario 4, där det fanns en öppning på utsidan. Överensstämmelsen mellan formerna (SC-värdet) för de enskilda och genomsnittliga tid-temperaturkurvor var genomgående sämst i brandrummet (0,7 till 0,85) medan den var nära 1 (0,95-0,98) i angränsande rum. Den genomsnittliga temperaturskillnaden (ERD) och förskjutningen (EPC) var som störst (d.v.s. mest avvikelse från medelvärdet) när ventilationen till brandrummet var begränsad.

## 2.5 Slutsats

Baserat på resultaten i artikeln anses det rimligt att förvänta sig en temperaturvariation i brandgaslagret, uttryckt som ett konfidensintervall (95 %), att vara i storleksordningen  $\pm 10$  till 35 % i denna typ av fullskaleexperiment. Variationen är beroende av ventilationsförhållanden och även på plats (brandrummet eller angränsande rum) och tid efter antändning.

Den stora mängden av tester, tillsammans med information om väderförhållanden, skapar möjligheter att använda de presenterade data i framtida utvärderingar av brandmodeller.

## 3 Numeriska experiment

I detta kapitel görs en sammanfattning av numeriska experiment. Inom ramen för projektet har numeriska experiment studerats och använts i artiklarna: "Numerical experiments and compartment fires" [16] publicerad i *Fire Sciences Reviews* och "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire" [17] publicerad i *Fire and Materials*.

### 3.1 Bakgrund

Bränder i rum är komplexa och kan enbart beskrivas analytiskt med enkla övergripande modeller på grund av det slumpmässiga beteendet som förekommer. För att studera bränder är därför experiment ett viktigt verktyg. Brandtekniska experiment kan utföras på olika skalor. Det kan vara på enskilda komponenter som t.ex. i konkalorimetern [29]. Det kan även vara i nerskalade modeller [30] eller i fullskala. De olika skalorna har sina fördelar och nackdelar. Vid tester av enskilda komponenter och nerskalade modeller finns det alltid en osäkerhet vid skalningen av resultatet till en verklig miljö (d.v.s. den externa validiteten). Studien som presenteras i kapitel 2 visar att det kan vara svårt att reproducera brandtekniska tester och att det finns många påverkande variabler som kan vara svåra att kontrollera. Dessutom är brandtekniska experiment i fullskala ofta kostsamma och tidskrävande.

Ett alternativ till traditionella experiment kan vara att använda olika typer av datormodeller som experimentella verktyg. Att använda datormodeller i en experimentell studie i stället för traditionella experiment kan benämnas numeriska experiment och det anses vara en lovande metod inom brandteknisk forskning eftersom de tillgängliga datormodellerna har utvecklats mycket de senaste årtiondena. Det finns dock både fördelar och utmaningar med numeriska experiment som bör lyftas och diskuteras.

I artikeln "Numerical experiments and compartment fires" görs en genomgång och diskussion av numeriska experiment utifrån ett antal genomförda studier under det senaste decenniet. Detta med syftet att utforska numeriska experiment som forskningsmetod brandteknisk forskning. I "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire" tillämpas numeriska experiment för att studera brandgastemperaturen i en två-rumskonfiguration.

### 3.2 Resultat

#### 3.2.1 Fördelar och utmaningar med numeriska experiment

Olika faktorer som påverkar noggrannheten i ett numeriskt experiment samt fördelar och utmaningar med numeriska experiment diskuteras i artikeln "Numerical experiments and compartment fires". Diskussionen bygger på en genomgång och jämförelse av exempel på genomförda numeriska experiment och traditionella full- och småskaliga experiment.

I artikeln används följande definition för numeriska experiment:

"Ett numerisk experiment utförs när en numerisk modell används på ett systematiskt experimentella tillvägagångssätt".

Numeriska experiment i den mening som avses i med definitionen har använts i flera brandtekniska studier de senaste decennierna [31–34], men tillvägagångssättet är oftast inte erkänt som en forskningsmetod som kan jämföras med traditionella experiment. Det finns både för- och nackdelar med att använda numeriska experiment. De tre främsta fördelarna är enligt artikeln [16]:

- Numeriska experiment är billigare jämfört med traditionella full- och småskaliga experiment. Flera numeriska simuleringar kan genomföras samtidigt om datorresurser finns tillgängliga. Till skillnad från traditionella experiment då endast ett enda test kan utföras åt gången och efter varje test skall den experimentella testuppställningen återställas.



- Det är möjligt att ha god kontroll över numeriskt experiment och därmed blir det lättare att studera beroendet mellan olika variabler. I ett traditionellt experiment kan det finnas flera påverkande variabler som är okända eller omöjliga att kontrollera.
- Med en numerisk modell kan mätningar göras utan att instrumentering (t.ex. termoelement) påverka mätningen. Dessutom är det möjligt att registrera tidsberoende information med en datormodell som t.ex. Fire Dynamics Simulator (FDS) [35] i alla celler som används i beräkningen.

Det finns också nackdelar med att använda numeriska experiment, och tre största nackdelarna är enligt artikeln [16]:

- Datormodeller är förenklingar av verkligheten. Det finns flera fenomen som förekommer i bränder, och som ingår i traditionella experiment, men som inte är möjliga att modellera på ett tillfredsställande sätt, t.ex. sotbildning och brandspridning (Quintiere 2012). Numeriska experiment måste därför användas med försiktighet eftersom de förenklingar som är tillämpade modell kan resultera i att viktig information förloras.
- Resultaten från ett numeriskt experiment är beroende av de val som gjorts av forskaren och detta kan vara problematiskt om forskaren inte är tillräckligt noggrann eller har en begränsad kunskap om branddynamik.
- Mycket valideringsarbete på olika brandmodeller har utförts genom att jämföra resultat från modeller med data från traditionella experiment. Trots detta har det visats att det bara finns ett fåtal modeller som kan förutsäga en handfull kvantiteterna inom de experimentella osäkerheterna som är typiska vid en rumsbrand [36,37].

Det är inte möjligt att rekommendera en metod för alla typer av experimentell forskning om rumsbränder. Traditionella experiment och numeriska experiment har båda sina styrkor och svagheter, och de bör ses som komplementära. Till exempel kan ett traditionellt experiment i liten skala kompletteras med ett numeriskt experiment i full skala. Ett annat exempel är att ett antal traditionella experimentella tester kan kompletteras med ett numeriskt experiment som innehåller en större mängd tester för att studera hur det studerade systemet svarar på manipulation av en eller flera oberoende variabler.

Vad som är det viktigaste resultatet av artikeln "Numerical experiments and compartment fires" är svårt att greppa eftersom artikeln har en utforskande karaktär. Men artikeln anses utgöra ett värdefullt bidrag till brandtekniskforskning, eftersom forskning med numeriska modeller uttryckligen betecknas som en experimentell metod och diskuteras på samma villkor som traditionella experiment.

### 3.2.2 Tillämpning

Syftet med artikel "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire" [17] har varit att utveckla en korrelation som kan användas för att beräkna brandgastemperaturen i ett rum intill ett brandrum. De oberoende variabler som anses styra temperaturökningen i ett angränsande rum,  $\Delta T_2$ , kan identifieras med hjälp av en enkel energibalans. Dessa variabler redovisas i ekvation 1.

$$\Delta T_2 = f(\dot{Q}, h_k, A_{T,1}, A_{T,2}, A_{O,1}\sqrt{H_{O,1}}, A_{O,2}\sqrt{H_{O,2}}) \quad (1)$$

Där  $\dot{Q}$  är effektutvecklingen,  $h_k$  är en värmetransportskoefficient,  $A_{T,1}$  och  $A_{T,2}$  är brandrummets och det angränsande rummets omslutande areor,  $A_{O,1}$  och  $H_{O,1}$  är arean och höjden på dörröppningen mellan brandrummet och det angränsande rummet,  $A_{O,2}$  och  $H_{O,2}$  är arean och höjden på dörröppningen mellan det angränsade rummet och utsidan.

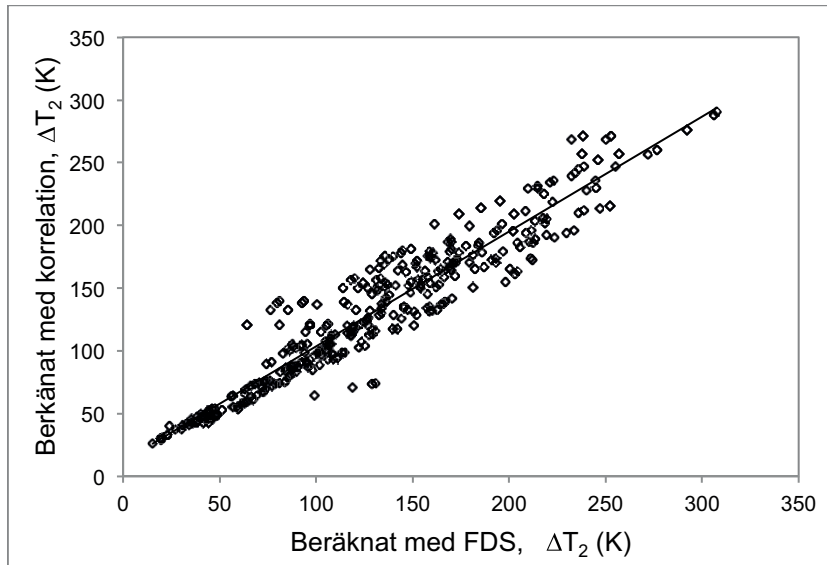
Ett numeriskt experiment genomfördes med ett antal simuleringar i FDS 5 (version 5.5.3). FDS 5 användes eftersom det har visats kunna prediktera brandgasspridning och brandgastemperatur bra i scenarier som påminner om den studerade situationen [36].

Sex variabler (se ekvation 1) manipulerades i mellan simuleringarna. Rummens dimensioner valdes slumpmässigt inom vissa intervall med begränsningen att den resulterande geometrin var inom ramen för giltigheten för två-zonsmodeller. Bredden och höjden på öppningarna varierades mellan 0,5 och 2,2 respektive 1 och 3,7 m. Brandkällan placerades i mitten av brandrummet och effektutvecklingen varierades mellan 320 och 2000 kW. Egenskaperna hos väggar och tak valdes ut för att efterlikna betong, lättbetong och tegel.

FDS 5 har främst validerats för välventilerade bränder [38] och därför studerades enbart sådana bränder. Data från 86 simuleringarna användes och totalt 344 observationer fanns tillgängliga för analys. Förhållandena mellan rumslängd/rumsbredd och rumslängd/rumshöjd var mindre än 5 och rumsbredd/rumshöjd-förhållandet var minst 0,5 i det numeriska experimentet. Detta är följaktligen gränserna för den resulterande korrelationen bör användas.

En multipel linjär regressionsanalys med de logarimerade värdena för samtliga variabler utfördes med det statistiska programpaketet SPSS. Detta resulterande i en korrelation (se ekvation 2) som hade en determinationskoefficient (R<sup>2</sup>-värde) på 0,93. De icke-logarimerade värdena för FDS simuleringarna plottas mot förutsägelserna med ekvation 2 i Figur 3.

$$\Delta T_2 = 10.4 \frac{\dot{Q}^{0.73} (A_{O,1} \sqrt{H_{O,1}})^{0.24}}{A_{T,1}^{0.45} A_{T,2}^{0.33} (A_{O,2} \sqrt{H_{O,2}})^{0.19} h_k^{0.34}} \quad (2)$$



**Figur 3: Beräknade värden med FDS kontra beräknade värden med ekvation 2. Diagrammet är återskapat utifrån ett diagram i den aktuella artikeln [17].**

Ekvation 2 kan användas för att studera hur olika variabler påverkar temperaturen i angränsande rum. Till exempel kan det ses att exponenten för effektutvecklingen är i princip den samma som i den s.k. MQH korrelationen [39], som används för att uppskatta temperaturen i ett brandrum.

Korrelationen baseras på resultat från FDS simuleringar, vilket innebär att ekvation 2 är en modell av en modell; följaktligen finns det en risk att den externa validiteten är låg. Beräkningar med ekvation 2 jämfördes därför med tidigare publicerade data från tre fullskaleförsök i artikeln. Resultaten från denna begränsade valideringsstudie var lovande med det fanns avvikelser. Dessa avvikelser kan bero på missuppfattning av experimentuppställning som ett resultat av den

begränsade information som ges i de ursprungliga publikationerna. Ytterligare utvärdering av den framtagna korrelationen föreslås därför i artikeln.

Ekvation 2 kan orsaka en s.k. "black box" effekt eftersom det inte finns någon fysikalisk innebörd i de olika konstanterna i korrelationen. Trots detta så ger korrelationen en tämligen enkel och okomplicerad metod som anses vara ett komplement till andra mer avancerade beräkningsmetoder.

## 4 Förenklad metod att beräkna brandgaslagrets höjd

I detta kapitel görs en sammanfattning av artikeln “A simplified relation between hot layer height and opening mass flow” [18] som presenterades på konferensen *11th International Symposium on Fire Safety Science* (IAFSS) 2014.

### 4.1 Bakgrund

För en fullt utvecklad brand i ett rum finns det en förenklad ekvation för att beräkna massflödet av brandgaser ut genom en dörr från rummet. Detta gör det möjligt att ställa upp en värmebalans för en enkel en-zons modell.

$$\dot{m}_g = 0.5 \cdot A_o H_o^{1/2} \quad (3)$$

När det gäller förhållanden för den tillväxande branden (s.k. två zons modell) finns det ingen liknande ekvation eftersom det fler parametrar som styr förhållanden och som ofta är okänd. Olika typer av datormodeller som använder en numerisk lösning behövs därför ofta. Målet med artikeln “A simplified relation between hot layer height and opening mass flow” har varit att ta fram uttryck, liknade det i ekvation 3 som kan användas för att uppskatta brandgaslagrets höjd och temperatur vid en tillväxande brand.

### 4.2 Metod

Grunden i framtagandet av ett förenklat uttryck för massflödet är följande massbalans:

$$\dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_g \quad (4)$$

Där massförlusten från bränslet,  $\dot{m}_f$ , är väldigt litet och kan ignoreras. I artikeln görs en förenkling av följande uttryck för massflödet in,  $\dot{m}_a$ , och ut,  $\dot{m}_g$  genom en öppning:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d \cdot W \cdot \rho_a \sqrt{2 \cdot g \cdot T_a / T_g \cdot (1 - T_a / T_g)} (H_o - H_N)^{3/2} \quad (5)$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \cdot W \cdot \rho_a \sqrt{2 \cdot g \cdot (1 - T_a / T_g)} (H_N - H_D)^{1/2} \left( H_N + \frac{1}{2} H_D \right) \quad (6)$$

En fullständig beskrivning av dessa ekvationer ges av Karlsson och Quintiere [40]. I artikeln görs förenklingen att massflödet inte är temperaturberoende, vilket stämmer någorlunda för förhållande över 200°C.

### 4.3 Resultat

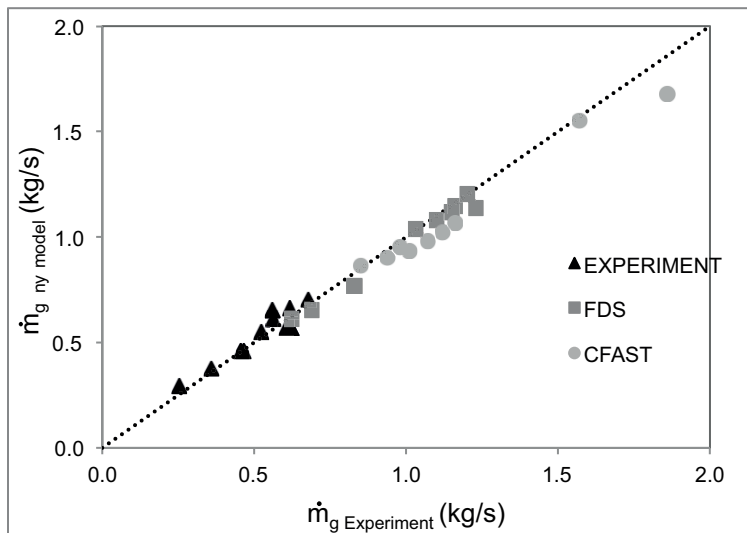
Följande två ekvationer tas fram i artikeln:

$$\dot{m}_g = 0.684 \cdot A_o \cdot H_o^{1/2} (1 - D) \quad (7a)$$

$$\dot{m}_g = 0.526 \cdot A_o \cdot H_o^{1/2} (1 - 0.3 \cdot D) \quad (7b)$$

Där  $D$  är ett mått på brandgaslagrets höjd,  $A_o$  och  $H_o$  är öppningens area respektive höjd. En förutsättning för att dessa ekvationer ska fungera är att förhållandena kan approximeras till en två-zons modeller och att  $D$  ligger mellan 0 och 0.7. Dessutom bör temperaturen i brandgaserna vara över 200°C.

I artikeln jämförs resultat med ekvation 7a med resultat från både datormodeller och från tidigare utförda experiment. Överlag gav ekvation 7a ett resultat inom en 13 % avvikelse från simuleringarna och experimenten, och en majoritet av resultaten låg inom 5 % (se Figur 4). Överensstämmelse ansågs därför vara bra med tanke på de osäkerheter som finns både i datormodeller och i experiment.



**Figur 4: Beräknat massflöde med ekvation 7a jämfört med data från CFAST, FDS och tidigare publicerade experiment. Den prickade linjen motsvarar en perfekt överensstämmelse. Diagrammet är återskapat utifrån en bild i den aktuella artikeln [18].**

I artikeln visas det också hur ekvationen 7a kan användas för att prediktera brandgaslagrets höjd. Även dessa beräkningar gav god överensstämmelse med beräkningar med datormodellerna CFAST och FDS.

#### 4.4 Slutsatser

En förenklad ekvation för att beräkna massflödet genom en öppning i en tillväxande brand (pre-flashover fire) presenteras i artikeln. Med denna ekvation är det möjligt att lösa mass- och energibalansen analytiskt i ett brandrum före övertändning. Tidigare har detta bara varit möjligt att göra med numeriska metoder.

## 5 Utvärdering av metoder för brand i en fler-rumslägenhet

Utvärdering av metoder för att studera förhållanden i en fler-rumslägenhet vid brand har genomförts i artikeln "An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires" [19] publicerad i *Fire Safety Journal*. En sammanfattning av artikelns innehåll görs i detta kapitel.

### 5.1 Bakgrund

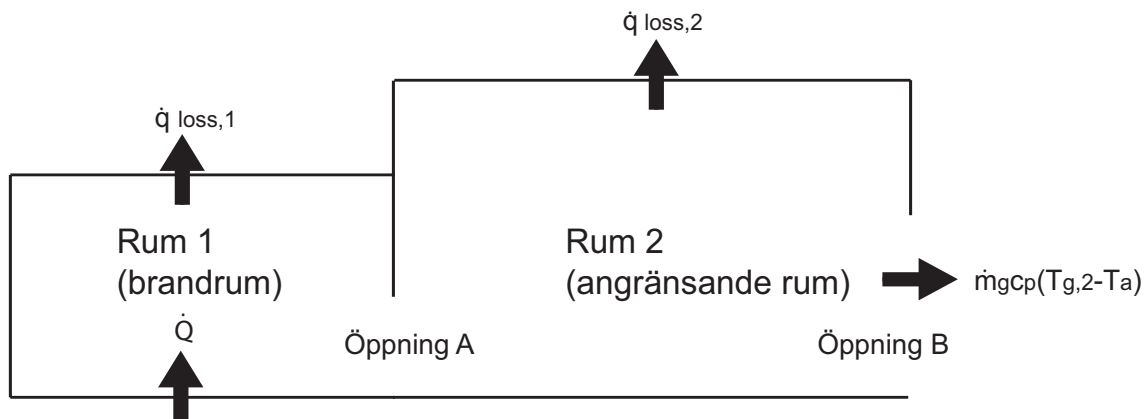
Baserat på det resultat som presenteras i artiklarna "A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire" (se kapitel 3) och "A simplified relation between hot layer height and opening mass flow" (se kapitel 4) erhålls två metoder för att beräkna förhållanden i rum angränsande till ett brandrum. Ekvation 2 är möjlig att använda för att direkt kunna beräkna temperaturen i ett angränsade rum. Ekvation 7a kan användas för att lösa följande energibalans för ett angränsande rum:

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_{g,2} - T_a) + \dot{q}_{loss,1} + \dot{q}_{loss,2} \quad (8)$$

Där  $\dot{m}_g$  beräknas med metoden beskriven i kapitel 4 och  $\dot{q}_{loss,1}$  och  $\dot{q}_{loss,2}$  är energiförlusterna genom väggar/tak i kontakt med brandgaser. Dessa förluster kan beräknas med följande ekvation:

$$\dot{q}_{loss,i} = hA_w \Delta T \quad (9)$$

Energibalansen i ekvation 8 illustreras i Figur 5. Ett exempel på hur metoden kan användas för att beräkna temperatur och brandgaslagrets höjd i en trerumslägenhet presenteras i bilaga A.



**Figur 5: Illustration av energibalansen (ekvation 8) för ett brandrum och ett angränsande rum. Bilden är återskapad utifrån en bild i den aktuella artikeln [19].**

Metoderna som presenteras i de två artiklarna är framtagna på olika sätt. Den empiriska metoden (metod 1) som presenteras i kapitel 3 är framtagen genom en regressions analys av data från ett numeriskt experiment. Den teoretiska metoden (metod 2) är framtagen genom att lösa en förenklad mass- och energibalans. Det kan således finnas skillnader mellan hur precisa och riktiga resultat som metoderna kan ge. För att undersöka detta har de båda metoderna utvärderats och jämförts mot experimentell data i artikeln "An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires" [19].

### 5.2 Metod

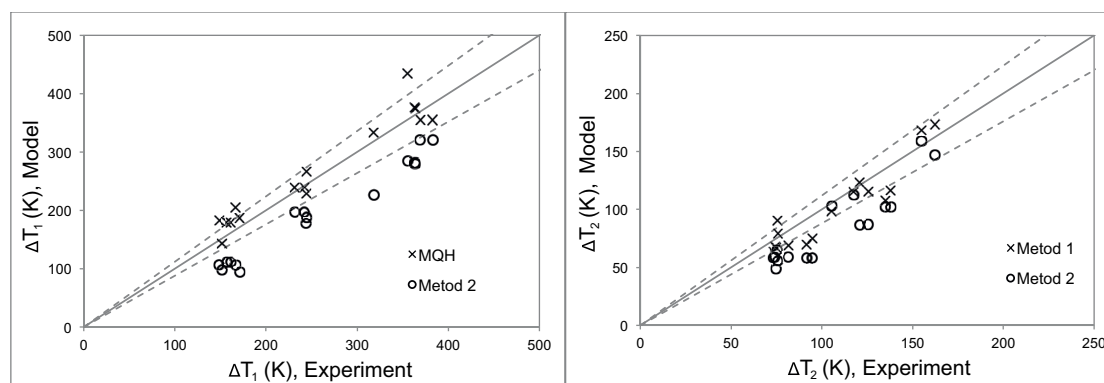
Utvärderingen har skett genom att jämföra resultat från de båda metoderna med mätningar från ett experiment i fjärdedelsskala. Experiment är förknippade med osäkerheter och i detta fall har en noggrann uppskattning och beräkning av dessa osäkerheter genomförts för att på så sätt kunna bättre kunna uppskatta osäkerheterna i modellerna.

I experimentet användes en uppställning som liknar den i Figur 5. Storleken på rummen och på öppningarna (öppning A och B) varierades. Totalt studerades fem olika geometriska scenarier, och genom att även variera brandkällan (effektutveckling och bränsle) skapades totalt 16 olika testuppställningar. Dessa uppställningar testades 3 eller 4 gånger vilket innebar att totalt 52 individuella tester genomfördes.

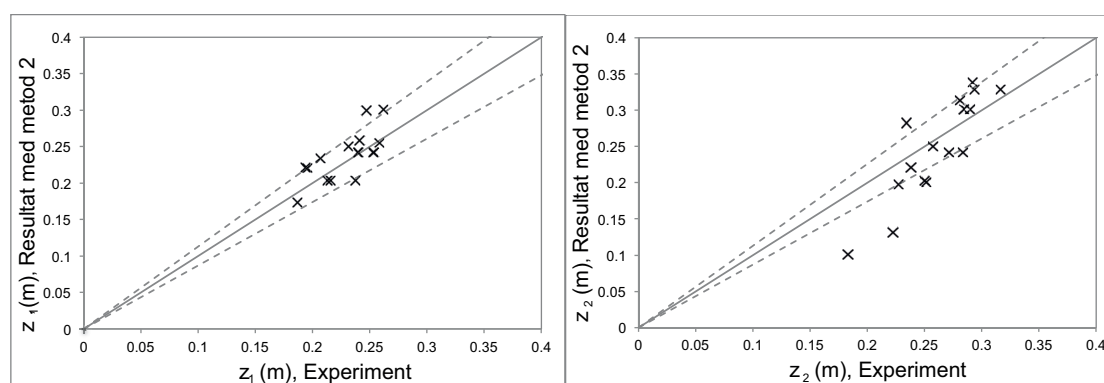
Termoelement placerades på flera ställen i varje rum och med hjälp av dessa kunde brandgaslagrets temperatur och höjd beräknas. De experimentella osäkerheterna beräknades utifrån flera parametrar och den relativa kombinerade osäkerheten för brandgaslagrets höjd var 13 % och 12 % för brandgaslagrets temperatur. Detta är i samma storleksordning som liknande tidigare genomförda experiment [37].

Baserat på beräkningar med två metoderna och de experimentella osäkerheterna var det möjligt att uppskatta modellosäkerheten. Modellosäkerheten beskrivs i artikeln med hjälp av precisionen (eng. precision) ( $\tilde{\sigma}_M$ ) och riktigheten (eng. bias) ( $\beta$ ).

Båda metoderna användes för att beräkna temperaturen i det angränsande rummet (se Figur 6) och metod 2 användes även för att beräkna brandgaslagrets höjd (se Figur 7).



**Figur 6: Beräknade värden mot experimentella värden för brandgastemperaturen i brandrummet (vänster) och angränsande rum (höger). Diagrammen är återskapade utifrån diagram i den aktuella artikeln [19].**



**Figur 7: Beräknade värden mot experimentella värden för brandgaslagrets höjd i brandrummet (vänster) och angränsande rum (höger). Diagrammen är återskapade utifrån diagram i den aktuella artikeln [19].**

Det finns så klart flera begränsningar med experimentet och dessa diskuteras i artikeln. Det konkluderas också att det finns flera fördelar och nackdelar med de båda metoderna. Metod 1 är enkel att använda eftersom det bygger på ett enda uttryck och ger både precisa och riktiga resultat i jämförelse med experimentet. Metod 2 är mer krävande att använda och gav inte riktigt lika bra förutsägelse men samtidigt är metoden mer transparent och flexibel jämfört med metod 1.

### 5.3 Slutsatser

Artikeln innehåller två stora forskningsbidrag. För det första presenteras experimentell data med en väl uppskattad experimental osäkerhet för en två-rums konfiguration. För det andra görs en noggrann utvärdering och demonstration av två metoder som kan används för att beräkna temperatur och brandgaslagrets höjd i utrymmen angränsade till ett brandrum. Något som tidigare inte varit möjligt med andra enkla handberäkningsverktyg.



## 6 Övriga relaterade publikationer

Det finns två relaterade publikationer som bör lyftas upp i samband med rapportering av projektet. Dessa publikationer sammanfattas kort i detta avsnitt.

### 6.1 Fire Dynamics in multi-room compartment fires

En stor del av arbete som presenteras i kapitel 2-5 har ingått i doktorsavhandlingen "Fire dynamics in multi-room compartment fires" [20].

Avhandlingen presenterades i april 2015 vid Lunds Tekniska Högskola. Avhandlingen är fritt tillgänglig via [Lunds Universitets bibliotek](#).

### 6.2 Radiative heat flux in a pre-flashover compartment fire

Artikeln "Radiative heat flux in a pre-flashover compartment fire" [21] presenterades på konferensen *2nd European Symposium on Fire Safety Science* i Nicosia, Cypern. Artikeln rör rumsbränder och anses därför relaterad till projektet.

Före övertändning finns det ett brandgaslager i de rum dit brandgaser sprids. I brandgaslagret är förhållandena inte ohållbara för människor. Under brandgaslagret anses däremot förhållanden vara bättre vilket kan möjliggöra för människor att utrymma. Strålning från branden, brandgaslagret och omgivande ytor kan dock påverka förutsättningarna för människor under brandgaslagret. I artikeln studeras det hur denna strålning bidrar till uppvärmningen av brandgaslagret och luftvolymen där under. En parameteranalys genomförs också för att undersöka hur bränslets strålningsfraktion och absorptionen i brandgaserna påverkar temperaturfördelningen i rummet.

Resultatet från studien visar att brandgaslagrets temperatur sjunker när bränslets strålningsfraktion ökar. Temperaturen i luftvolymen under brandgaslagret är mer beroende av bränslets strålningsandel från 0 till 0,50 att ge i en ökning av temperaturer i luftvolymen från 34 till 100°C. Enligt de svenska byggreglerna är kritisk temperatur för människor 80°C. Följaktligen kan förhållandena i den under luftvolymen vara kritiska om strålningsandelen av bränslet betraktas i beräkningen. Detta görs dock sällan i enkla handberäkningsmetoder. Dessutom kan gastemperaturen avvika från den faktiska temperaturen som person utsätts för, i artikeln visas t.ex. att temperaturen på ytor (väggar, golv) under brandgaslagret ökar från 70 till 216°C när strålningsandelen från bränslet ökar från 0 till 0,5. Hudtemperaturer liknande dessa kan vara möjliga på en person som befinner sig under brandgaslagret.

Sammanfattningsvis kan man konkludera att enkla handberäkningsmetoder, som t.ex. MQH korrelationen [39], är bra eftersom de kan ge bra överslagsberäkningar på kort tid, men resultaten kommer inte att säga något av villkoren nedanför det varma lagret där utrymmande människor och räddningspersonal kan finnas. Förhållanden under brandgaslagret kommer att vara mer relaterade till bränsleegenskaper (som t.ex. bränslets strålnings andel) än i det varma brandgaslagret.

## 7 Slutsats

I detta arbete har brandgasspridning mellan rum studerats. Den övergripande målsättningen med projektet var att studera rumsgeometris påverkan på brandgasspridning inom en brandcell. En förutsättning för att göra detta är att det finns enkla och validerade handberäkningsmetoder för rumsbränder. Metoder för att beräkna förhållandena i brandrummet finns redan och de är välbeskrivna i litteraturen, men för studier av förhållanden i rum angränsande till brandrummet fanns det innan detta projekt började mycket begränsat med metoder för handberäkningar. En stor del av arbetet i detta projekt har därför ägnats åt att utveckla sådana verktyg.

Projektet har inneburit nya insikter på området om brandgasspridning i fler-rumslägenheter och arbete anses vara intressant och viktigt både för personer som arbetar med funktionsbaserad brandteknisk projektering och för forskare inom brandteknik. Nedan listas de viktigaste bidragen från projektet:

- Reproducerbarheten av ett fullskaligt experiment i en tre-rumslägenhet har studerats och visats vara i storleksordningen  $\pm 10$  till 35 %, uttryckt som ett konfidensintervall (95 %) runt medelvärdet. Reproducerbarheten är beroende av ventilationsförhållanden; det är lättare att reproducera ett scenario där tillgången till luft är stor. Placeringen av mätutrustning och tiden efter antändning kommer också att påverka reproducerbarheten.
- Numeriska experiment är en lovande forskningsmetod inom brandteknik. Ingen experimentell metod kan rekommenderas för alla omständigheter, men olika experimentella metoder, såsom numeriska experiment och traditionella fullskaleförsök kan komplementera varandra på ett bra sätt för att på effektivt sätt få det mesta ur experimentell forskning.
- Handberäkningsmetoder som kan användas för att bättre förstå ett problem är viktiga och särskilt värdefulla inom brandteknik, där komplexa fenomen ofta behandlas. Två metoder för att beräkna förhållandena i ett rum som angränsar till ett brandrum har utvecklats inom detta projekt. Den första metoden består av ett enda enkelt matematiskt uttryck som kan användas för att förutsäga brandgaslagrets temperatur i ett angränsande rum inom 10 % av experimentella värden. Den andra metoden består av flera beräkningssteg, men är transparent och kan användas för att beräkna både brandgaslagrets höjd och temperatur i ett angränsande rum.
- De två handberäkningsmetoderna kan användas för att göra uppskattningar vid brandteknisk projektering och utvärdering. Metoderna bidrar också till en bättre förståelse av vilka variabler som är av betydelse vid denna typ av komplexa problem. En god förståelse av grundläggande branddynamik rörande det aktuella problemet anses nödvändigt för att använda mer avancerade datormodeller.

## 8 Fortsatt arbete

Detta projekt anses utgöra ett värdefullt bidrag till områdena branddynamik och rumsbränder. Det finns dock flera områden som har anknytning till projektet som bör uppmärksammas i framtiden.

- De metoder som presenteras och utvärderas i denna rapport kan utvecklas också vidare. I det presenterade arbetet har de två metoderna utvärderats med ett småskaligt experiment, men ytterligare utvärdering och validering mot experiment i verklig skala är önskvärt. De två metoderna gäller dessutom för ett enkelt fall där tillgången på luft är god och bränslet är placerat mitt i rummet. Framtida arbete skulle därför kunna göras för att utveckla och förfinas metoderna för andra möjliga situationer.
- I rapporten har det belysts att det är viktigt att det finns enkla metoder att tillgå, parallellt med avancerade datormodeller, för att användare ska kunna erhålla en övergripande förståelse av branddynamiken i det studerade problemet. Sådana metoder anses vara värdefull inte bara för rumsbränder, men även för andra typer av bränder i byggnader. Liknande tillvägagångssätt som används i denna avhandling skulle kunna tillämpas för att skapa enkla tekniska metoder för bränder i stora utrymmen. Bränder i konstruktionselement är en annan typ av bränder som utgör ett relativt outforskat område. Bränder i konstruktioner är ett område som behöver mer uppmärksamhet i framtiden eftersom det är viktigt att förstå hur brand sprider sig och utvecklas i konstruktionselement (t.ex. väggar och fasader) för att minska egendomsskadorna vid brand.

## 9 Referenser

- [1] Boverket, Boverkets Byggregler (BFS 2014:3), Boverket, Karlskrona, Sverige, 2014.
- [2] Her Majesty's Government, The Furniture and Furnishings (Fire) (Safety) Regulations, Statutory Instruments 1988 No. 1324, Storbritannien, 1988.
- [3] International Atomic Energy Agency, Protection against Internal Fires and Explosions in the Design of Nuclear Power Plants, Wien, Österrike, 2004.
- [4] M. Malmqvist, Myndigheten för Samhällsskydd och Bredskap, personlig kommunikation, 2014.
- [5] Local Government Association, Fire safety in purpose built blocks of flats, Department of the Environment and Local Government, London, Storbritannien, 2012.
- [6] L. Audouin, Multi-Compartment Fires: State of the art, Radioprotection and Nuclear Safety Institute (IRSN), Saint Paul lez Durance Cedex, Frankrike, 2006.
- [7] G. Heskestad, J. Hill, Experimental Fires in Multiroom/Corridor Enclosures, Factory Mutual, Norwood, MA, USA, 1986.
- [8] I. Nakaya, T. Tanaka, M. Yoshida, K. Stechler, Doorway flow induced by a propane fire, *Fire Saf. J.* 10 (1986) 185–195. Doi:10.1016/0379-7112(86)90015-9
- [9] J. Rockett, M. Morita, L. Cooper, Comparisons of NBS/HARVARD VI simulations and data from all runs of a full-scale multi-room fire test program, *Fire Saf. J.* 15 (1989) 115–169. Doi:10.1016/0379-7112(89)90001-5
- [10] L. Audouin, L. Rigollet, H. Prétrel, W. Le Saux, M. Röwekamp, OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results, *Fire Saf. J.* 62 (2013) 80–101. Doi:10.1016/j.firesaf.2013.07.008
- [11] W.D. Walton, P.H. Thomas, Estimating Temperatures in Compartment Fires, in: P.J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, 4th ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, USA, 2008: pp. 204–222.
- [12] Ö. Andersson, *Experiment!*, John Wiley & Sons, Chichester, Storbritannien, 2012.
- [13] M. Fröderberg, The human factor in structural engineering, *Konstruktionsteknik*, Lunds Tekniska Högskola, Lund, Sverige, 2014.
- [14] A.R. Lamb, Computer analysis : avoiding the “black box” syndrome, in: *Proc. ICE*, 2004: pp. 134–139.
- [15] N. Johansson, S. Svensson, P. van Hees, A Study of Reproducibility of a Full-Scale Multi-Room Compartment Fire Experiment, *Fire Technol.* (2014). Doi: 10.1007/s10694-014-0408-3
- [16] N. Johansson, Numerical experiments and compartment fires, *Fire Sci. Rev.* 3 (2014) 2. Doi: 10.1186/s40038-014-0002-2

- [17] N. Johansson, P. van Hees, A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire, *Fire Mater.* 38 (2014) 182–193. Doi: 10.1002/fam.2172
- [18] N. Johansson, P. van Hees, A Simplified Relation Between Hot Layer Height and Opening Mass Flow, in: 11th Int. Symp. Fire Saf. Sci., Christchurch, New Zealand, 2014. Doi: 10.3801/IAFSS.FSS.11-432
- [19] N. Johansson, S. Svensson, P. van Hees, An evaluation of two methods to predict temperatures in multi-room compartment fires, *Fire Saf. J.* 77 (2015) 46–58. Doi: 10.1016/j.firesaf.2015.07.006
- [20] N. Johansson, Fire Dynamics of Multi-Room Compartment Fires, Rapport 1055, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2015.
- [21] N. Johansson, J. Wahlqvist, Radiative heat flux in a pre-flashover compartment fire, in: 2nd Eur. Symp. Fire Saf. Sci., Nicosia, Cyprus, 2015.
- [22] G. Holmstedt, S. Bengtsson, P. Blomqvist, T. Dittmer, B. Hägglund, H. Tuovinen, et al., Quality assurance of accident and injury prevention with fire safety in buildings, Lunds Tekniska Högskola, Lund, Sverige, 2008.
- [23] A. Hamins, K. McGrattan, Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2: Experimental Uncertainty, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA, 2007.
- [24] SIS, Noggrannhet (riktighet och precision) för mätmetoder och mätresultat – Del 2 : Grundläggande metod för bestämning av en standardiserad mätmetods repeterbarhet och reproducerbarhet, Swedish Standards Institute, 2003.
- [25] R. Getka, Reproducibility and Correlation of Fire Test Methods Applied for Floor Coverings, *Arch. Combust.* 30 (2010).
- [26] D. Madrzykowski, C. Fleischmann, Fire Pattern Repeatability: A Laboratory Study on Gypsum Wallboard, *Int. Symp. Fire Investig. Sci. Technol.* (2010).
- [27] M.L. Janssens, Heat Release Rate (HRR), in: T.J. Ohlemiller, E.L. Johnsson, R.G. Gann (Eds), *Meas. Needs Fire Saf.* Gaithersburg, MD, USA, 2000, pp. 186–206.
- [28] R.D. Peacock, P.A. Reneke, R.W. Bukowski, V. Babrauskas, Defining flashover for fire hazard calculations, *Fire Saf. J.* 32 (1999) 331–345. Doi:10.1016/S0379-7112(98)00048-4
- [29] ISO, Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), International Organization for Standardization, Geneva, Schweiz, 2002.
- [30] J.G. Quintiere, Scaling applications in fire research, *Fire Saf. J.* 15 (1989) 3–29. Doi: 10.1016/0379-7112(89)90045-3
- [31] K.B. McGrattan, A. Hamins, D. Stroup, Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Interaction -- Large Scale Experiments and Model Development, National Institute of Standards and Technology, USA, 1998.

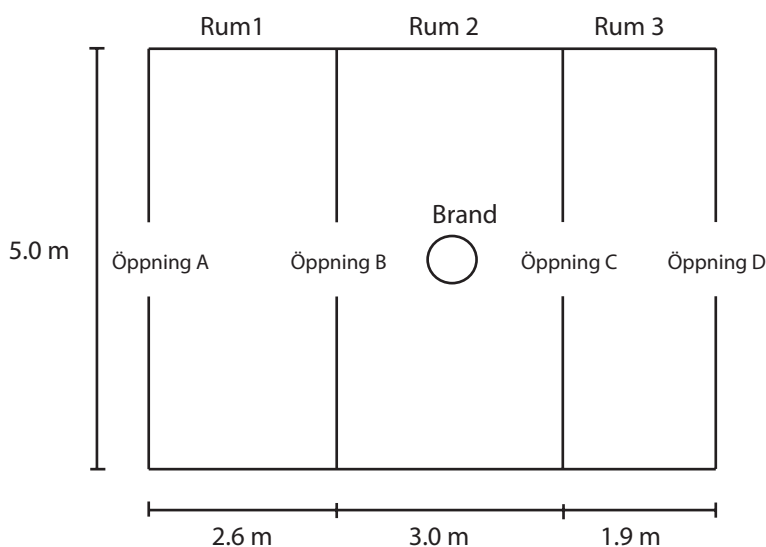
- [32] K. Prasad, G. Patnaik, K. Kailasanath, A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires, *Fire Saf. J.* 37 (2002) 569–589. Doi: 10.1016/S0379-7112(02)00004-8
- [33] W.K. Chow, G.W. Zou, Correlation equations on fire-induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulation, *Build. Environ.* 40 (2005) 897–906. Doi: 10.1016/j.buildenv.2004.09.010
- [34] N. Tilley, X. Deckers, B. Merci, CFD study of relation between ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks, *Fire Saf. J.* 48 (2012) 11–20. Doi: 10.1016/j.firesaf.2011.12.005
- [35] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, K. McGrattan, et al., *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2013.
- [36] D. Najafi, F. Jolgar, J. Dreisbach, *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 1: Main report*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, USA, 2007.
- [37] K. McGrattan, R. Peacock, K. Overholt, *Validation of Fire Models Applied to Nuclear Power Plant Safety*, *Fire Technol.* (2014). Doi: 10.1007/s10694-014-0436-z
- [38] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, *NIST Special Publication 1019-5 Fire Dynamics Simulator ( Version 5 ) User's Guide*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2010.
- [39] B.J. McCaffrey, J.G. Quintiere, M.F. Harkleroad, Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, *Fire Technol.* 17 (1981) 98–119. Doi: 10.1007/BF02479583
- [40] B. Karlsson, J.G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, Boca Raton, USA, 1999.

## Bilaga A – Beräkning av brandgaslagret höjd och temperatur i närliggande rum

I denna bilaga presenteras ett exempel som tidigare presenteras i avhandlingen “Fire dynamics in multi-room compartment fires” [20]. Metod 2 som kortfattad presenteras i kapitel 5 demonstreras i denna bilaga.

### A.1 Beskrivning av problemet

En enkel trerumslägenhet används för att illustrera hur metod 2 kan används. Branden placeras i mittenrummet som har en öppning till rum 1 och rum 2. Dessa angränsande rum har i sin tur öppningar till det fria.



**Figur A.1: Planlösning för tre-rumslägenheten. Bilden är återskapade utifrån en bild i den aktuella avhandlingen [20].**

Alla öppningar är 0,9 m breda och 2,0 m höga och takhöjden är 2,4 m. De omslutande ytorna (tak, väggar och golv) består av 0,15 tjock lättbetong. De termiska egenskaperna för lättbetong som används i beräkningen återfinns i tabell A.1.

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Densitet, $\rho$           | 525 kg/m <sup>3</sup> |
| Specifikt värme, $c$       | 1050 J/kg K           |
| Termisk konduktivitet, $k$ | 0,125 W/m K           |

**Tabell A.1: Termiska egenskaper för lättbetong.**

Brandens diameter är 800 mm och effektutvecklingen är 800 kW. Strålningsandelen från bränslet är 0,35.

### A.2 Lösning

Beräkningen genomförs i flera steg. Först görs antagandet att plymmassflödet är det samma som massflödet som lämnar rummet (d.v.s.  $\dot{m}_p = \dot{m}_g$ ) och höjden till brandgaslagret i brandrummet (rum 2),  $z_{int,2}$ , kan beräknas med följande ekvationer:

$$\dot{m}_g = 0.68 A_{o,2} H_o^{1/2} (1 - z_{int,2}/H_o) \quad (A.1)$$

$$\dot{m}_p = 0.0058 \dot{Q}_c (z/L) \quad \text{gäller för } L > z_{int,2} \quad (A.2)$$

Detta leder till följande uttryck:

$$0.0058\dot{Q}_c(z_{int,2}/L) = 0.68A_{o,2}H_o^{1/2}(1 - z_{int,2}/H_o) \quad (A.3)$$

Där  $A_{o,2} = A_{o,B} + A_{o,C}$  och  $H_o = H_{o,B} = H_{o,C}$ . Flamhöjden,  $L$ , beräknas med Heskestads flamhöjds korrelation, enligt följande:

$$L = 0.235\dot{Q}^{2/5} - 1.02D_f = 2,6 \text{ m} \quad (A.4)$$

Alla variabler förutom  $z_{int,2}$  i ekvation A.3 är kända, vilket innebär att det är möjligt att räkna ut  $z_{int,2}$  till 1,20 m. Eftersom öppningarna B och C lika stora blir  $\dot{m}_{g,B} = \dot{m}_{g,C} = 0,5\dot{m}_g$ . Brandgaslagrets höjd i rum 1,  $z_{int,1}$ , och rum 3,  $z_{int,3}$ , beräknas med A.1.

$$\dot{m}_{g,B} = \dot{m}_{g,A} = 0.68A_{o,A}H_{o,A}^{1/2}(1 - z_{int,1}/H_{o,A})$$

$$\dot{m}_{g,C} = \dot{m}_{g,D} = 0.68A_{o,D}H_{o,D}^{1/2}(1 - z_{int,3}/H_{o,D})$$

Öppning A och D är likas stora vilket innebär att  $z_{int,1} = z_{int,3}$ . Brandgaslagrets höjd i rum 1 och 3 beräknas till 1,20 m. Temperaturökningen i brandrummet kan beräknas med ekvation A.5.

$$\Delta T_{g,2} = \frac{\dot{Q}_c}{(\dot{m}_g c_p + hA_{W,2})} \quad (A.5)$$

$\dot{Q}_c$  är den konvektiva delen av effektutvecklingen (d.v.s.  $0,65 \dot{Q}$ ). Den specifika värmekapaciteten,  $c_p$ , antas vara 1 kJ/kg K och area på ytor i kontakt med brandgaserna,  $A_{W,2}$ , beräknas enligt följande:

$$A_{W,2} = (l_2 \cdot w_2) + 2 \cdot (l_2 \cdot (H_2 - z_{int,2})) + 2 \cdot (w_2 \cdot (H_2 - z_{int,2})) \\ - (w_{o,B} \cdot (H_{o,B} - z_{int,2})) - (w_{o,C} \cdot (H_{o,C} - z_{int,2}))$$

Värmeöverföringskoefficienten,  $h$ , kan uppskattas enligt (ekvation A.6) om det antas att väggar och tak är halvoändliga och att ytemperaturen är den samma som gastemperaturen.

$$h = \sqrt{\frac{k\rho c}{\pi t}} \quad (A.6)$$

Nu kan temperaturökningen i brandrummet beräknas till 311 K med ekvation A.5 efter 300 sekunder. Brandgaslagrets temperatur de angränsande utrymmena kan också beräknas med följande uttryck som är omskrivningar av ekvation A.5.

$$\Delta T_{g,1} = \frac{\dot{m}_{g,B} c_p \Delta T_2}{\dot{m}_{g,A} c_p + hA_{W,1}}$$

$$\Delta T_{g,3} = \frac{\dot{m}_{g,C} c_p \Delta T_2}{\dot{m}_{g,D} c_p + hA_{W,3}}$$

Ytan i kontakt med brandgaser i rum 1,  $A_{W,1}$ , och 3,  $A_{W,3}$ , beräknas på samma sätt som i brandrummet. Värmeöverföringskoefficienten kan också beräknas som i brandrummet. En sammanställning av resultaten av beräkningar ges i Tabell A.2.



|                  | Metod 2       |                |
|------------------|---------------|----------------|
|                  | $z_{int}$ (m) | $\Delta T$ (K) |
| Rum 1            | 1.20          | 227            |
| Rum 2 (brandrum) | 1.20          | 311            |
| Rum 3            | 1.20          | 254            |

**Tabell A.2: Sammanställning av resultatet från beräkningarna.**