



# LUND UNIVERSITY

## Slutredovisning från projekten "Brandteknisk dimensionering baserad på beräkning" (SBUF) och "Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering" (Brannforsk)

Magnusson, Sven Erik; Frantzich, Håkan; Lundin, Johan

1997

[Link to publication](#)

### *Citation for published version (APA):*

Magnusson, S. E., Frantzich, H., & Lundin, J. (1997). *Slutredovisning från projekten "Brandteknisk dimensionering baserad på beräkning" (SBUF) och "Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering" (Brannforsk)*. (LUTVDG/TVBB--3093--SE; Vol. 3093). Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.

### *Total number of authors:*

3

### **General rights**

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### **Take down policy**

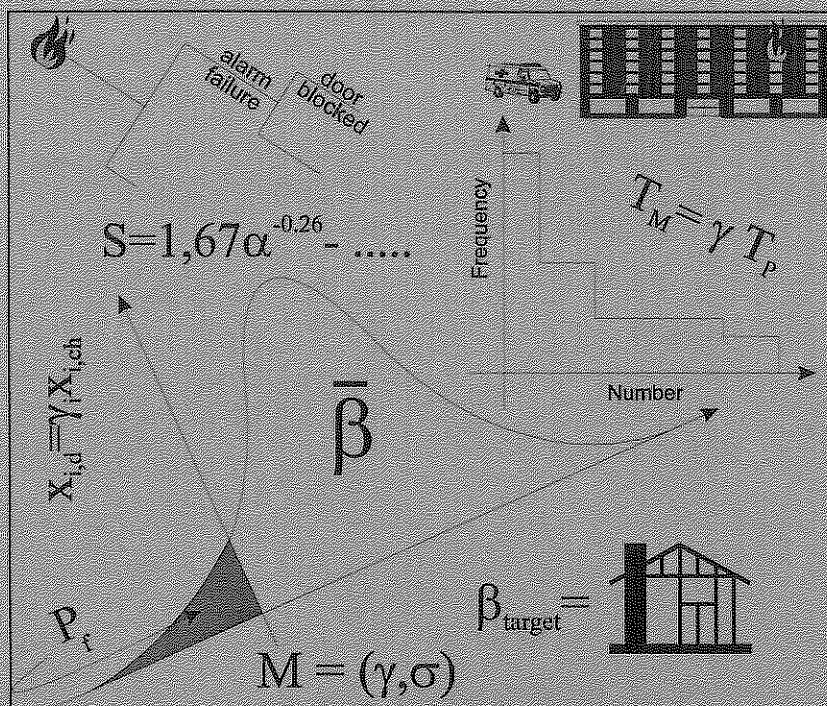
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



Rapport 3093



Slutredovisning från projekten  
"Brandteknisk dimensionering baserad på  
beräkning" (SBUF)  
och  
"Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering"  
(Brandforsk)

Utförd på uppdrag av SBUF och BRANDFORSK

Sven Erik Magnusson  
Håkan Frantzich  
Johan Lundin

Lund Juni 1997

ISSN 1102-8246

ISRN LUTVDG/TVBB--3093--SE

SBUF projekt nr. 2123

Brandforsk projekt nr. 423-961

**Keywords:** risk assessment, FOSM, model uncertainty, fire, design event-tree, reliability index

**Abstract:** This is a summary report of two integrated three year projects "Fire safety design based on calculations" and "Performance based fire safety design". The total project has been subdivided into several part projects: general principles for risk assessment, evacuation safety of public buildings, hotels and health care buildings, calculation of safety factors, calculation of model uncertainties, uncertainties in input data. A key concept has been analysis of uncertainty. Two main risk assessment methods have been studied: the reliability index  $\beta$  method and the event-tree evaluation method.

The study has demonstrated and illustrated the practical application of basic risk and assessment methods and provided the foundation for a general design methodology based on performance and the concept of risk.

© Copyright Institutionen för brandteknik  
Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet, Lund 1997

Department of Fire Safety Engineering · Lund Institute of Technology · Lund University

---

Adress/Address	Telefon/Telephone	Telefax	E-post/E-mail
Box 118 /John Ericssons väg 1 S-221 00 LUND	046 - 222 73 60 +46 46 222 73 60	046 - 222 46 12 +46 46 222 46 12	Sven_Erik.Magnusson@brand.lth.s

# Resultatredovisning från projekten "Brandteknisk dimensionering baserad på beräkning" och Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering"

De olika rapporter eller redovisningar på annat sätt som sammanfattas i denna rapport inkluderar bl a

## 1. Institutionsrapporter

- I1. Magnusson, S.E., Frantzich, H., Harada, K., Fire Safety Design Based on Calculations, Uncertainty Analysis and Safety Verification, Report 3078, Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund 1995.
- I2. Lundin, J., Uncertainty in Smoke Transport Models, Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, 1997. To be published, May 1997.
- I3. Kristjansson, G.K., On Probabilistic Assessment of Life Safety in Buildings on Fire. Faculty of Engineering, University of Iceland and Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, 1996.
- I4. Frantzich, H., Fire Safety Risk Analysis of a Health Care Facility. Report 3085, Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund 1996.
- I5. Frantzich, H., Fire Safety Risk Analysis of a Hotel, Report 3091, Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, 1996.
- I6. Magnusson, S.E., Uncertainty Analysis: Identification, Quantification and Propagation. Report 7002, Dept of Fire Safety Engineering, Lund University, 1997.

## 2. Internationella tidskrifter

- IT1. Magnusson, S.E., Frantzich, H., Harada, K., Fire Safety Design Based on Calculations. Fire Safety Journal, Vol 27 (1996), 305-334.

## 3. Nationella tidskrifter

- NT1. Magnusson, S.E., Att branddimensionera efter beräknad risk, Bygg och Teknik 6/96.

## 4. Internationella konferenser och symposier (proceedings)

- IK1. Magnusson, S.E., Frantzich, H., Karlsson, B. and Särdaqvist, S., Determination of Safety Factors in Design Based on Performance. Fire Safety Science - Proceedings of the 4<sup>th</sup> Intern'l Symp IAFSS, pp 937-948, Gaithersburg, 1994.
- IK2. Magnusson, S.E., How to Derive Safety Factors, International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design methods, Ottawa 24-26 Sept 1996.

IK3. Frantzych, H., Holmquist, B., Lundin, J., Magnusson, S.E. and Rydén, J., Derivation of Partial Safety Factors for Fire Safety Evaluation Using the Reliability Index  $\beta$  Method. Fire Safety Science - 5th Intern'l Symposium, Melbourne 1997.

IK4. Invited plenary lecture: Magnusson, S.E., Risk Assessment, Fire Safety Science - 5th Intern'l Symposium, Melbourne 1997.

## 5. **Avhandling**

A1. Frantzych, H., Risk Assessment Methods in Fire Safety Engineering.

# Innehållsförteckning

## Sammanfattning

1. **Inledning**
2. **Det ändrade läget vad gäller möjligheter att dimensionera med hjälp av beräkningar**
3. **Läget internationellt**
4. **Varför nya brandbestämmelser?**
5. **Problembeskrivning**
6. **Allmänt om riskberäkningar**
  - 6.1 Händelseträdsmetodik
  - 6.2 Beskrivning av praktiskt fall  
Ekvationer och händelseträd
  - 6.3 Använda fördelningar
  - 6.4 Datorprogram och regressionsekvationer
7. **Utvärdering av säkerhetsnivå för enstaka scenario**
  - 7.1 Riskberäkningsmetoder
  - 7.2 Länk riskberäkning - dimensionering, enstaka scenario
8. **Riskberäkning och -presentation för händelseträd**
9. **De ingående delprojekten**
  - 9.1 DP1: Grundläggande analys. Allmänna principer för riskbaserad dimensionering
  - 9.2 DP2: Riskanalys av sjukhus
  - 9.3 DP3: Riskanalys av hotell
  - 9.4 DP4: Framtagande av partialkoefficienter
    - 9.4.1 Allmänt om partialkoefficienter
    - 9.4.2 Algoritm för bestämning av partialkoefficienter
  - 9.5 DP5: Säkerhetsnivåer i byggnader dimensionerande med traditionell metod
  - 9.6 DP6: Osäkerheter i beräkningsmodeller för spridning av brandgas
  - 9.7 DP7: Osäkerheter i indata
10. **Summering**
  - 10.1 Allmänt
  - 10.2 Några huvudresultat från forskningssynpunkt
  - 10.3 Resultat för projektörsledet

## Sammanfattning

Resultaten från två integrerade tre-års projekt "Brandteknisk dimensionering baserad på beräkning" (SBUF) och "Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering" (Brandforsk) avrapporteras kortfattat.

Det övergripande syftet med projektet har varit att försöka ta fram metoder som gör det möjligt att i större omfattning använda brandteknisk projektering baserad på beräkning.

Projektet har bl a innehållit följande delsyften:

- att bestämma viktiga beräkningsscenarier,
- att definiera variationsintervall för viktiga faktorer,
- att bestämma säkerhetsnivån för ett antal scenarier,
- att utprova olika metoder som kan användas för att fastställa acceptabel risk,
- att ta fram en metod för att räkna fram dimensionerande värden för utrymningsberäkningar baserad på den acceptabla risken.

I samtliga fall kan viktiga praktiska resultat redovisas samtidigt som en pionjärinsats har gjorts för att klarlägga metodiken vad gäller beräkningsbaserad brandteknisk dimensionering.

## 1. Inledning

I denna rapport summeras det arbete som utförts under två integrerade projekt; "Brandteknisk dimensionering baserad på beräkning", finansierat av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) samt "Funktionsbaserad brandteknisk dimensionering", finansierat av Styrelsen för Svensk Brandforskning, Brandforsk.

Det totala projektet har resulterat i ett antal delrapporter, tidskriftsartiklar samt presentationer vid främst internationella konferenser och symposier, se listan ovan. Avsikten med denna rapport är att översiktligt beskriva projektets bakgrund, ge en inblick i de metoder som använts samt presentera de viktigaste resultaten ur projektörssynpunkt såväl som forskningsmässigt. För att hålla omfånget av denna sammanfattning till en rimlig nivå minimeras beskrivningen av teoretiska metoder; för en mer fullständig redogörelse hänvisas till de publicerade delrapporterna.

I kapitel 2 beskrivs den nya svenska bygglagstiftningen, i kapitel 3 de senaste årens internationella utveckling. Mot denna bakgrund skisseras i kapitel 4 de problem och frågor som uppkommit och som bestämt projektets specifika struktur. Denna struktur redovisas i kapitel 9, där också de viktigaste resultaten återges. Projektet summeras, slutligen, i kapitel 10

## 2. Det ändrade läget vad gäller möjligheter att dimensionera med hjälp av beräkningar

Samhällets krav vad gäller förebyggande brandförsvar är i första hand inriktade på omsorgen om människors säkerhet och i andra hand på egendomsskyddet. I det först nämnda fallet är det brandens tidiga skede som är av intresse medan den fullt utvecklade, långvariga branden har störst inverkan på egendomsskydd. Vad gäller egendomsskyddet har det sedan länge funnits internationellt erkända metoder för ingenjörsmässig dimensionering vad gäller byggnaders stabilitet. Vad gäller omsorgen för människors säkerhet har utveckling av datormodeller som förutsäger brandförloppet i en byggnad varit omfattande. Inom bl a följande områden existerar ingenjörsmässiga beräkningsmetoder:

- stabilitet och bärförmåga
- brandtillväxt och spridning i primärt brandrum
- spridning av brand utanför primärt brandrum
- spridning av brandgaser i byggnad
- avstånd mellan byggnader
- aktivering av sprinkler och detektorer
- människors utrymning av byggnader

Detta har lett till att ingenjörer i en växande grad använder sådana modeller för brandteknisk dimensionering med hänsyn till människors säkerhet och utformning av brandskyddstekniska system.

De senaste decennierna har utvecklingen inom byggnadsindustrin lett till att det byggs allt större och mer komplexa byggnader. Som exempel kan nämnas stora varuhus med många öppna våningar, underjordsanläggningar, överbyggda gårdar och byggnader med stor, osekionerad golvarea. De traditionella preskriptiva bestämmelserna har för denna



typ av byggnader i stort sett varit utan relevans; en godtagbar dimensionering har fått produceras i varje enskilt fall genom kompromisser mellan inblandade parter.

Detta, samt den ökade kunskapen inom brandtekniken, har lett till att en ny generation brandskyddsregler har formulerats i ett flertal länder. Den nya generationen av byggnadsbestämmelser gällande brandskydd innebär att man övergår till mer funktionsbaserade regler eller föreskrifter.

De huvudkrav som gäller för byggnadstekniskt brandskydd återfinns i 4§ BVF där det sägs att

*"Byggnadsverk ska vara projekterade och utförda på sådant sätt att*

1. Byggnadsverkets bärförmåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid
2. utveckling och spridning av brand och brandgaser inom byggnadsverket begränsas
3. spridning av brand till närliggande byggnadsverk begränsas
4. personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt
5. räddningsmanskapets säkerhet vid brand beaktas."

4§ BVF förtydligas ytterligare i BBR, avsnitt 5 (BFS 1995:17). De avsnitt som närmast är av betydelse för denna rapport är 5:13 och 5:14.

### **5:13 Dimensionering genom beräkning**

Om dimensionering av brandskyddet sker genom beräkning, skall beräkningen utgå från omsorgsfullt vald dimensionerande brand och utföras enligt beräkningsmodell som på ett tillfredsställande sätt beskriver aktuellt fall. Vald beräkningsmodell skall redovisas.

Råd: Osäkerheten hos valda indata bör redovisas genom gjorda känslighetsanalyser.

Vi skall i avsnitt 10 återvända till problemet att "omsorgsfullt välja" en dimensionerande brand och påvisa hur resultaten från detta projekt direkt kan användas för att lösa denna från praktisk synpunkt mycket viktiga fråga.

### **5:14 Kontroll av utrymningsdimensionering**

För byggnader där risken för personskador är stor får utrymningsdimensionering genom beräkning endast användas, om beräkningens riktighet kan styrkas genom dimensioneringskontroll.

Råd: Med dimensioneringskontroll avses kontroll av dimensioneringsförutsättningar, bygghandlingar och beräkningar.

Det helt avgörande praktiska problemet är att det hitintills varit omöjligt att ge anvisningar vare sig om modellval eller om val av dimensionerande värden, att sätta in i den valda beräkningsmodellen. Den praktiska innebörden är att relevansen av de utförda beräkningarna för det reella säkerhetsproblemet blir helt beroende av den enskilda ingenjörens eller konsultens kompetens och yrkeserfarenhet.

### 3. Läget internationellt

En rad olika länder har liksom Sverige de senaste åren infört funktionsbaserade brand-skyddsbestämmelser, exempelvis Australien, Nya Zeeland, Storbritannien m fl. Samma svaghet vidlåder dessa bestämmelser; ingen vägledning ges för val av modeller och säkerhetsfaktorer (även benämnda partialkoefficienter, osäkerhetsfaktorer) för att uppnå en specificerad säkerhetsnivå. Vanligen finns bara ett allmänt påpekande att säkerhetsfaktorer skall väljas med hänsyn till omständigheterna. De australiensiska bestämmelserna innehåller följande formulering "Osäkerheter i indata eller modeller kräver att adekvata säkerhetsfaktorer används för att säkerställa att ett konservativt resultat erhålls".

ISO/TC92/SC4 "Fire Safety Engineering" har under 1997 sänt ut en serie tekniska rapporter för att klarlägga metodik och kunskapsläge för brandteknisk dimensionering byggd på beräkningar. Inte heller dessa nya standards innehåller nödvändiga dimensioneringsuttryck.

### 4. Varför nya brandbestämmelser?

Frågan uppstår varför nya brandbestämmelser införts trots att det vetenskapliga och ingenjörsmässiga underlaget är dokumenterat bristfälligt. Försöker vi räkna upp för- och nackdelar blir resultatet så här:

Den stora fördelen med funktionsbaserade normer är bl a att:

- Ny kunskap lättare kan beaktas.
- Den pedagogiska uppbyggnaden av reglerna blir klarare.
- Brandskyddslösningarna blir mer flexibla och bättre anpassade till det specifika objektet.
- Jämnare säkerhetsnivåer erhålls mellan olika byggnader.
- Brandskyddsprojektering kommer på sikt att jämföras ingenjörsmässigt t ex med projektering av bärverk.
- Komplicerade byggnader kan projekteras där hänsyn tas till både säkerhet och ekonomi.

Nackdelen med funktionsbaserade regler är:

- Att de ställer högre krav på såväl projektörer som granskande myndigheter.
- De kan leda till högre projekteringskostnader men bör leda till billigare helhetslösning i slutändan.
- Överföring av tekniskt kunnande tar oundvikligen lång tid. De närmaste åren kommer därför dimensioneringsförfarande enligt de ny reglerna att mötas med viss skepsis.

Slutsatsen blir alltså att de nationella myndigheterna anser att uppkomna svårigheter är av initieell karaktär och bör kunna övervinnas genom förbättrad utbildning kombinerad med forskningsinsatser. **Det är i detta perspektiv det här redovisade projektet bör betraktas.**

## 5. Problembeskrivning

Vi har upprepade gånger nämnt uttrycken "funktionsbaserade bestämmelser" och "dimensionering utförd med beräkning". Implicit i dessa begrepp ligger:

- med funktionskrav avses krav på specificerad risknivå
- att kriterier för acceptabel risk har formulerats
- att kriterier påvisas uppfyllda genom beräkningar (eller på annat sätt)

Nyckelbegreppet är alltså beräknad eller uppskattad risk. Risk definieras här som sannolikheten att en eller flera människor skall omkomma vid inträffad brand. I förra fallet talar vi om individuell risk; i det senare om samhällsrisker.

Bl a följande frågor uppkommer nu

- (a) hur utvärderar eller beräknar vi risk?
- (b) hur varierar utvärderingsmetoder med val av systemnivå eller dimensioneringsnivå? Exempel på olika nivåer utgör t ex
  - riskberäkning för en hel byggnad med stort antal rum
  - riskberäkning för ett delsystem, exempelvis ett delsystem för begränsning av brandutbredning
  - riskberäkning för en enstaka skyddskomponent, t ex ett sprinklersystem
- (c) vad är länken mellan riskberäkningsprocedurer och beräkningsgång för dimensionering? Exaktare uttryckt: Hur skall indata väljas i en beräkningsgång så att slutresultatet återspeglar en förutbestämd risknivå?
- (d) riskberäkning innebär beräkningar baserade på modeller och parametrar som karakteriseras av osäkerhet. Parametrar som förbränningshastighet (brandeffektkurva), antal människor/m<sup>2</sup> golvyta, människors reaktionsmönster m.fl. är inte kända deterministiskt utan måste beskrivas som stokastiska (slumpvisa) med hjälp av statistiska fördelningar. I vilken utsträckning existerar denna nödvändiga databas för väldefinierade klasser av byggnader som flervåningsbostadshus, kontor, hotell, vårdanläggning, etc?
- (e) vilka metoder tillgriper vi för att beräkna risknivåer för enstaka, stora och komplexa objekt av typ stora underjordiska anläggningar, sportanläggningar, värmekraftverk?
- (f) vad är inverkan av stora fel, dvs av att skyddssystem inte fungerar eller att parametrar (ex.vis brandtillväxt) antar värden som ligger helt utanför de statistiska fördelningar som utgör basen för våra beräkningar?

- (g) beräkningsmodeller är behäftade med ofrånkomliga osäkerheter. Hur kan dessa beräknas? Hur kan hänsyn till modellosäkerheter ske i en dimensionering?

## 6. Allmänt om riskberäkningar

### 6.1 Händelseträdsmetodik [I1]

Händelseträdsanalys är den vanligen använda metoden för att analysera komplexa brandscenarier i vilka flera säkerhetssystem eller nödprocedurer finns installerad. Avsikten är att studera skadenivåer totalt och förutsättningen är att en riskkälla initierats; dvs en brand har startat och nått det stadium att självsläckning eller släckning medelst handbrandsläckare ej är möjlig.

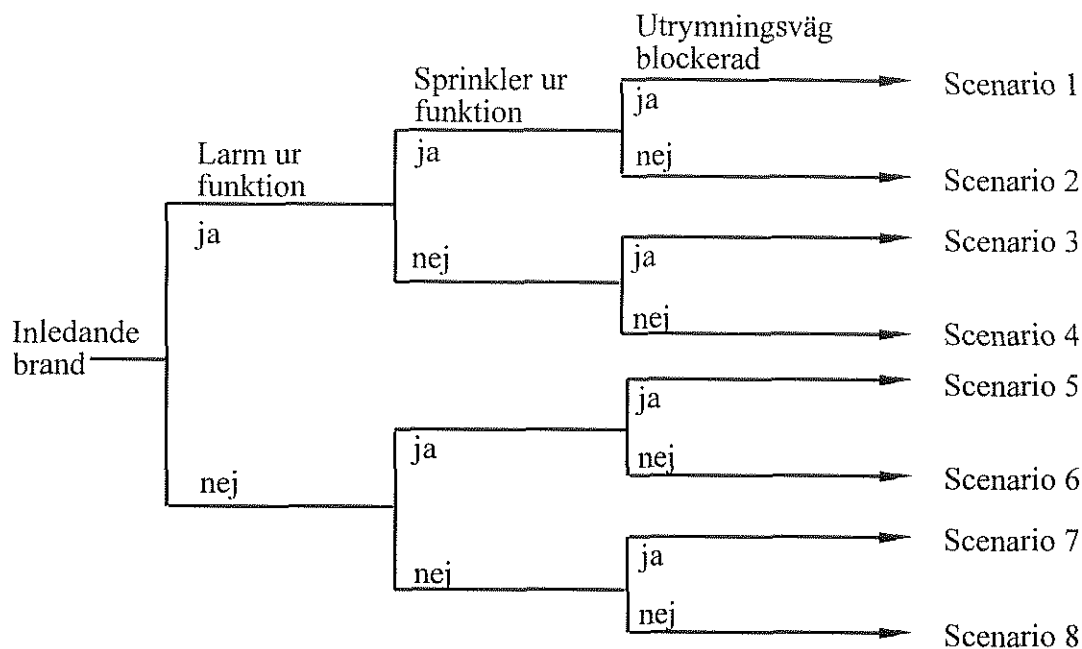
Ett händelseträd är en grafisk, logisk modell som identifierar och kvantifierar möjliga utfall när en brand startat tillväxten och som ger en systematisk beskrivning av hur händelseförloppen framskrider i tiden. Vid varje händelsenod analyseras två eller flera alternativ till dess att ett slutligt utfall har erhållits för varje väg genom trädets. De olika alternativen måste anges med respektive sannolikheter, och slutsannolikheten för en viss sluthändelse eller -konsekvens erhålls genom multiplikation av de olika villkorliga sannolikheterna för det specificerade händelseförloppet (scenariet). Man kan definiera risk som en rankad mängd av taltripplar

$$R = \{E_i, pE_i, \bar{c}E_i, i = 1 \dots n\}$$

där det första elementet  $E_i$  betecknar ett scenario, dvs en speciell väg genom händelseträdet,  $pE_i$  betecknar slutsannolikheten för scenariot och  $\bar{c}E_i$  är en vektor som beskriver det enskilda scenariots olika konsekvenser. Vi kommer i senare avsnitt att diskutera olika sätt att representera risk erhållen från evaluering av händelseträd; vi börjar med att beskriva ett händelseträd och riskberäkning av ett enskilda scenario i detta händelseträd.

### 6.2 Beskrivning av praktiskt fall. Ekvationer och händelseträd [I1]

För att göra beskrivningen något mindre abstrakt väljer vi att beskriva olika metoder genom deras användning på ett specificerat problem. Det vi skall beskriva är säkerhetsmarginalen för utrymning vid en brand i ett enskilda rum. Exempel på byggnader som kan innehålla denna typ av rum är teatrar, biografteater, kyrkor, sporthallar, osv. De olika scenarierna definieras utifrån olika förutsättningar vad gäller larm, sprinkler och nödutgångar. De olika möjligheterna kan ses i nedanstående händelseträd. Se Figur 1.



Figur 1. Händelsetråd för beskrivning av scenarier i samlingslokal.

Säkerhetsmarginalen beskrivs av följande relation:

$$G = S - D - R - E \geq 0 \quad (1)$$

där

$S$  = Tid för brandgaserna att nå ner till 1.6 m över golvnivå (sekunder). Denna tid påverkas av om rummet är utrustat med sprinkler eller ej. Andra variabler som påverkar är brandens tillväxthastighet ( $\alpha$ ), golvytan och rummets höjd.

$D$  = Detektionstid (sekunder). Tiden beror på typ av rum, om det finns brandlarm, rummets höjd och brandens tillväxthastighet.

$R$  = Respons- och aktivitetstid innan evakuering (sekunder). Beror på vilken typ av utrymningslarm som det finns i byggnaden. Det finns även en del andra faktorer som kan tas i beaktande t.ex. typ av rum, antal rum, tidigare utrymningsträning och rumsyta. Informationen som används i beräkningarna kommer från en undersökning bland svenska brandbefäl.

$E$  = Förflyttningstid (sekunder). Beräknas i princip som den tid det tar för en folkmasa att passera genom ett dörröppning. Denna tid beror på antal tillgängliga dörrar, deras bredd och antal personer i rummet.

Vi kommer att anta att rummet har fyra utgångar. Varje dörr har en bredd på 1.2 m. Detta ger en total dörrbredd på 4.8 m. I fyra av de åtta scenarierna blir en av dessa dörrar blockerad. Detta sker i scenarierna 1, 3, 5 och 7.

Variablerna  $S$ ,  $D$ ,  $R$  och  $E$  är samtliga stokastiska variabler, antingen i sig eller som en funktion av mer grundläggande parametrar. Innebörden är att  $S$ ,  $D$  osv beskrivs av olika sannolikhetsfördelningar.

## Variabel S

Tiden för brandgaserna att nå angiven höjd beräknas ur följande relation (se avsnitt 6.4):

$$S_1 = 1.67\alpha^{-0.26} H^{0.44} \text{Area}^{0.54} \text{ sekunder} \quad (2a)$$

där

$\alpha$  = Brandens tillväxthastighet (kW/s<sup>2</sup>)

H = Takhöjd (m)

Area = Golvyta (m<sup>2</sup>)

Uttrycket ovan gäller för de situationer där det inte finns något fungerande sprinkler-system. Om sprinklersystemet fungerar används relationen:

$$S_2 = 0.025\alpha^{-0.114} H^{0.457} \text{Area}^{1.28} \text{ sekunder} \quad (2b)$$

## Variablerna D och R

Uttrycken för D och R varierar med valt scenario. I scenarierna 1-4 bestäms D och R ur

D<sub>1</sub> - Lognormal (10, 5) sekunder

R<sub>1</sub> - Lognormal (300, 300) sekunder

I scenarierna 5-8 kommer det att finnas ett fungerande automatiskt brandlarm. Detta innebär att folk i lokalen kommer att upptäcka på ett tidigare stadium att det har börjat brinna. Detta kommer att påverka komponenterna D och R. Tid till kritiska förhållanden bestäms av relation S<sub>1</sub>. Följande uttryck för D och R används:

$$D_2 = 5.36\alpha^{-0.478} H^{0.7} \text{ sekunder} \quad (3)$$

$$R_2 - \text{Lognormal (130, 120) sekunder} \quad (4)$$

## Variabel E

Tid för folks rörelse ut ur rummet beräknas med hjälp av följande uttryck:

$$E = \frac{N \text{ Area}}{F W} \quad (5)$$

där

N = Persontäthet (personer/m<sup>2</sup>)

Area = Golvyta (m<sup>2</sup>)

F = Flödeskapacitet genom dörrarna (personer/m·s)

W = Dörrbredd (m)

### 6.3 Använd fördelningar [I1]

Exempel på använda standardfördelningar:

$\alpha$  - Likformig (0.001,0.1) - (kW/s<sup>2</sup>)

H - Likformig (3,12) - (m)

Area - Likformig (200,1200) - (m<sup>2</sup>)

N - Likformig (0.1,1.0) - (per/m<sup>2</sup>)

F - 1.0 (Konstant) - (per/sm)

W - 3.6 alt 4.8 (Konstant) - (m)

### 6.4 Datorprogram och regressionsekvationer [I1]

Komponenterna S och D ovan beskrivs av enkla analytiska uttryck. Dessa har härletts genom att komplicerade datormodeller för beräkning av brandgasers spridning och detektionstider har använts, för ett stort antal fall. Genom regressionsanalys har sedan uttrycken ovan härletts. Vanligen betecknas sådana uttryck med begreppen responsytor eller metamodeller. Metodiken med responsytor har använts genomgående under projektet.

## 7. Utvärdering av säkerhetsnivåer för enstaka scenario [I1]

### 7.1 Riskberäkningsmetoder

Nästa steg blir att finna metoder att beräkna risken dels för enstaka scenarios, dels för hela händelseträdet i Figur 1. Vi börjar med det enstaka scenariet.

Förutsättningen är att vi har ett beräkningsmodell i form av ett analytiskt uttryck eller ett datorprogram med vars hjälp kan beräknas deterministiskt om ett visst gränstillstånd är uppnått eller inte. Exempelvis kan utrymningssäkerheten uppskattas via ett uttryck  $g(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ , där  $g < 0$  innebär att utrymningsmarginalen  $< 0$  är otillfredsställande.  $x_1 \dots x_n$  är indata som brandutvecklingshastighet, byggnadens geometri, antal människor. Vid en riskberäkning ersätts de deterministiska värdena  $x_1, \dots x_n$  med motsvarande stokastiska värden  $X_1, X_2, \dots X_n$  och i stället för ett klart ja eller nej på frågan om utrymningen är tillfredsställande erhålls bara en sannolikhet för att detta gäller.  $X_1 \dots X_n$  beskrivs alltså av statistiska fördelningar som måste hämtas från praktiska inventeringar eller subjektiv expertbedömning.

Låt oss anta att vi kan använda analytiska uttryck, dvs att gränstillståndet deterministiskt beskrivs via  $g(x_1, \dots x_n) = 0$  och stokastiskt via  $G(X_1, \dots X_n) = 0$ . Vi antar vidare att vi behandlar bara ett brandfall, dvs att vi bara har en ekvation  $g$  eller  $G$ . Sannolikheten att

$G < 0$  uttrycker sannolikheten  $P_f$  för otillfredsställande funktion.  $P_f$  kan nu utvärderas genom två helt skilda metoder

- genom Monte Carlo-simulering
- genom säkerhetsindex-metod, FOSM

Den första metoden innebär i princip att vi utgår från fördelningarna  $X_1 \dots X_n$ , hämtar slumpvisa värden från dessa, beräknar  $g$  och upprepar processen, låt oss säga 5000-10000 gånger. Vi erhåller därvid en fördelning av  $G$ , och den yta av denna fördelning som uppfyller villkoret  $G < 0$  är  $= P_f$ .

Värdet på  $P_f$  ges enklast av  $P_f = k/n$ , där  $n$  = totala antalet beräkningar av  $g$  och  $k$  = det antal fall för vilka  $g < 0$ .

FOSM-metoden utgår från att vi känner medelvärde och standardavvikelse för variablerna  $X_1 \dots X_n$  och att dessa kan transformeras till motsvarande uttryck för en standardiserad, normalfördelad variabel  $X'_i$ . I det vektor-rum som spänns upp av  $X'_1, \dots, X'_n$  definierar  $G(X'_1, \dots, X'_n) = 0$  en gränsyta som skiljer säker zon från osäker zon. Metoden beräknar den punkt  $x^* = (x_1^* \dots x_n^*)$  på denna yta som är närmast origo. Denna punkt definierar mest trolig brott- eller felpunkt, och avståndet mellan origo och  $x^*$  betecknas säkerhetsindex  $\beta$ . För normalfördelade variabler och ett lineärt uttryck  $G$  är

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

där  $\Phi$  = den standardiserade normalfördelningsfunktionen. För andra fördelningar  $X_i$  och annat gränsuttryck  $G$  kan också  $P_f$  beräknas.

Beteckningen FOSM står för First Order Second Moment, vilket indikerar att  $\beta$  beräknas med utgångspunkt från en linearisering (first order) av  $g$  och med användning av medelvärden och standardavvikelser (second moments) för ingående parametrar. FOSM-metoden är den grundläggande metoden för tillförlitlighetsbaserad dimensionering av bärande konstruktioner och har alltså en mycket vidsträckt ingenjörsteknisk användning.

## 7.2 Länk riskberäkning - dimensionering, enstaka scenario

Antag att det riskbaserade kriteriet uttrycks som

$P(G(X_1, \dots, X_n) < 0) < P(\text{kriterium})$  där  $P(\ )$  betecknar sannolikhet. Det ekvivalenta deterministiska kriteriet uttrycks då som

$$g(x_{1,d}, x_{2,d}, \dots, x_{n,d}) = 0$$

där  $x_{1,d}, \dots, x_{n,d}$  betecknar de dimensionerande värden som insatta i uttrycket ovan ger en skydds nivå med  $P_f = P(\text{kriterium})$ .



Vi har ovan sett att vi för givna  $X_1, \dots, X_n$  erhåller den dimensionerande punkten  $x^* = (x_1^* \dots x_n^*)$  på ytan  $G(x_1 \dots x_n) = 0$  samt motsvarande  $\beta$  och  $P_f$ . Uppgiften är nu den delvis omvända; dvs att med utgångspunkt från givet  $\beta$  eller  $P_f$  beräkna  $x_d = (x_{1,d} \dots x_{n,d})$ , ekvivalent,  $x^* = (x_1^* \dots x_n^*)$ . Vanligen brukar dimensionerande värden  $x_{i,d}$  skrivas som

$$x_{i,d} = \gamma_i X_{i,ch}$$

där  $x_{i,ch}$  är ett karakteristiskt värde, definierat som exempelvis 80%- eller 95%-fraktilen av motvarande parameter  $X_i$ . I och med att FOSM direkt ger  $x_{i,d}$ ,  $i = 1 \dots n$ , blir denna faktorisering av  $x_{i,d}$  onödig men kan naturligtvis fortfarande göras.

Metoder att genomföra en säkerhetskontroll kan delas upp i 3 nivåer, nivå 1, 2 och 3.

Nivå 1: Säkerheten anges via dimensionerande värden, definierade enligt ovan.

Nivå 2: Säkerheten anges genom ett säkerhetsindex och approximativt felkriterium  $P_f$ , beräknat med utgångspunkt för medelvärde och standardavvikelse för  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Nivå 3: Säkerheten anges genom ett exakt angivet felkriterium, beräknat genom att betrakta de fullständiga fördelningarna för  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Varje nivå kan bara valideras genom beräkningar på närmast högre nivå. Valet av dimensionerande värden  $x_i^*$  kan bara kontrolleras genom att de appliceras över en hel klass av byggnader ger så uniforma säkerhetsnivåer, dvs  $\beta$  eller  $P_f$  som möjligt. Låt oss som exempel betrakta utrymningssituationen från en samlingslokal.  $x_i^*$  eller  $x_{i,d}$  ska väljas så att  $\beta$  eller  $P_f$ , sett över samtliga byggnader med olika geometriska mått och antal personer/m<sup>2</sup>, varierar så litet som möjligt, dvs avvikelsen från det normgivna värdet på  $\beta$  måste minimeras. På samma sätt kan  $\beta$ -värdena på nivå 2 verifieras genom att  $P_f$  minimeras över antalet möjliga fullständiga fördelningar. Dimensionering på nivå 3 kan verifieras på en nivå 4, innehållande krav på en ekonomisk optimering.

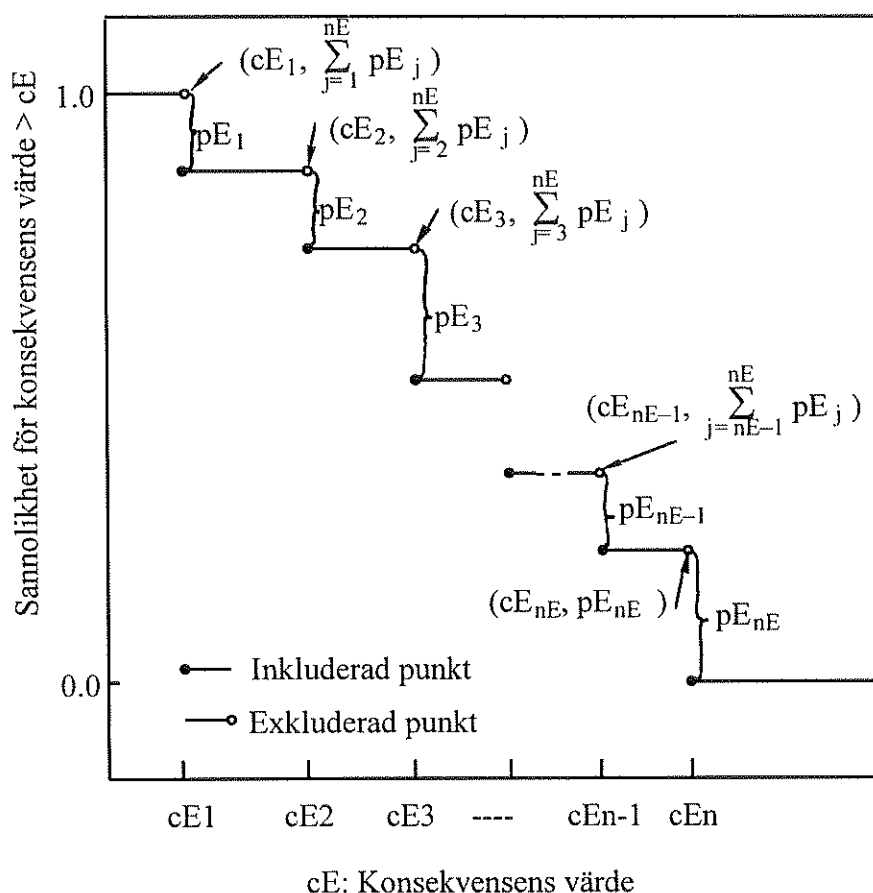
Det bör betonas att den angivna metodiken i princip är helt parallell med användning av säkerhetsindex  $\beta$  och partialkoefficienter i Boverkets Konstruktionsregler BKR 94.

## 8. Riskberäkning och -presentation för händelsetråd [I1]

Om vi har ett antal scenarier beskrivs beräkningssituationen via ett händelsetråd. För ett måttligt antal fall är det beräkningsmässigt möjligt att göra Monte Carlo-simuleringen av de olika "grenarna" av trädet och sedan väga samman de beräknade fördelningarna till en slutfördelning, som ger  $P_f = k/n$  som förut. En metod att allmänt beräkna säkerhetsindex  $\beta$  blir mycket komplicerad. Om vi har ett mycket stort antal brandfall blir en fullständig osäkerhetsanalys enligt ovan oralistisk. Låt oss som exempel anta en kontorsbyggnad med stort antal moduler. En fullständig riskanalys på systemnivå "hel byggnad" kräver här att utrymningssäkerheten betraktas för olika standardbränder initierade i samtliga rum, med och utan aktiva system, med dörrar öppna eller stängda, med

varierande tid för brandkårsinsats, etc. Antalet scenarios växer snabbt till tusentals. Metodiken blir här att beskriva det fullständiga antalet brandfall via ett händelsetråd och evaluera detta via kalkylblad som EXCEL eller Lotus 1-2-3 eller med hjälp av specialskrivna mjukvara.

Betrakta händelsetrådet i Figur 1. Antag att alla osäkerheter kan försummas och att alla grens sannolikheter är fixerade. Utfallet från varje scenario  $E_i$  är ett talpar  $(pE_i, cE_i)$  där  $pE_i$  = slutsannolikheten och  $cE_i$  är konsekvensen, i detta fall, säkerhetsmarginalen  $g$ .  $g < 0$  innebär att utrymningsstid saknas och utrymningen misslyckats. Det åtta utfallen  $cE_i$  kan rangordnas så att  $cE_i \leq cE_{i+1}$ . Det vanliga sättet att representera risken eller information i genom är den komplementära fördelningsfunktionen som erhålls med den beskrivna rangordningen, se Figur 2. Vanligen benämns kurvan i Figur 2 "CCDF" (complementary cumulative distribution function) eller F-N kurva.



Figur 2. Uppbyggnad av komplementär fördelningsfunktion, CCDF.

Figureerna 1 och 2 illustrerar vad som väsentligen är ett en-rumsproblem. För att beräkna personsäkerheten i en flerrumsbyggnad beskrivs personrisken  $RL_{tot}$  som

$$RL_{tot} = \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T RL(s, f, t)$$

där

$S$  = antalet initiella brandkällor i varje rum

F = antalet scenarios (grenar genom händelseträdet)

T = antalet utrymmen där livshotande miljöer kan uppstå

RL(s,f,t) = personrisken för en given brandkälla, scenario och kritisk plats i utrymningsväg

## 9. De ingående delprojekten

Det av SBUF/Brandforsk finansierade totala projektet har varit indelat i 8 delprojekt DP1 - DP8 enligt nedan

DP1: Grundläggande analys. Allmänna principer för riskbaserad dimensionering

DP2: Utrymningssäkerhet i vårdanläggningar

DP3: Utrymningssäkerhet i hotell

DP4: Framtagande av partialkoefficienter

DP5: Säkerhetsnivåer i byggnader dimensionerade med traditionell metod

DP6: Bestämning av modellosäkerheter

DP7: Analys av osäkerheter. Statistiska data för indata till beräkningar

DP8: Brandtillväxtkurvor. Bestämning av dimensionerande brand

Delprojekt DP8 genomförs vid SP och redovisas i annat sammanhang.

### 9.1 DP1: Grundläggande analys. Allmänna principer för riskbaserad dimensionering [I1, IT1, IK1, IK4]

I delprojektet avrapporteras en systematisk kartläggning av applicering av kvantitativa riskanalysmetoder på händelseträdet i Figur 1. De fem använda metoderna är

**Metod 1.** En fullt probabilistisk metod för ett enstaka scenario, med användning av analytiska metoder för analyser av osäkerheter. Slutresultatet är bl a säkerhetsindex  $\beta$  och felsannolikhet  $P_f$ .

**Metod 2.** Fallet med ett enstaka scenario behandlat med enkel Monte Carlo-simulering.

**Metod 3.** Samma fall behandlat med avancerad Monte Carlo-simuleringsmetodik.

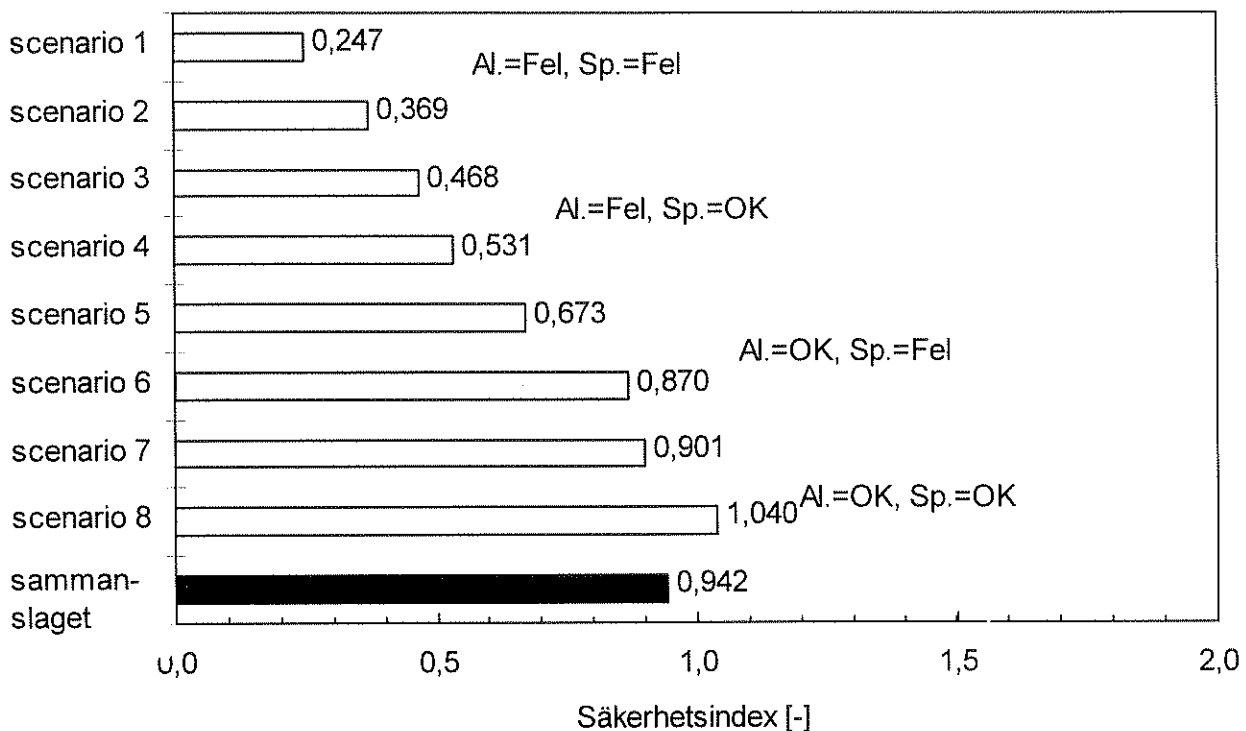
**Metod 4.** Händelseträdet evaluerat deterministiskt enligt Figur 2.

**Metod 5.** Händelseträdet evaluerat probabilistiskt, dvs med osäkerhetsanalys inkluderad.

Figurerna nedan representerar bara en liten del av de beräknade resultaten. I redovisningen ingår också resultat från Håkan Frantzich's pågående avhandlingsarbete [A1].

#### Metod 1, säkerhetsindex $\beta$ -metoden

Slutresultatet från beräkningarna är säkerhetsindex  $\beta$ , ett approximativt värde på felsannolikheten  $P_f$  samt dimensionerande värden på de stokastiska parametrarna. Figur 3 ger säkerhetsindex för de 8 scenarierna, Figur 4 hur den totala osäkerheten kan delas in i komponentosäkerheter.  $M_S$ ,  $M_D$  och  $M_E$  betecknar modellosäkerheter för termerna S, D och E, se ekv 1.



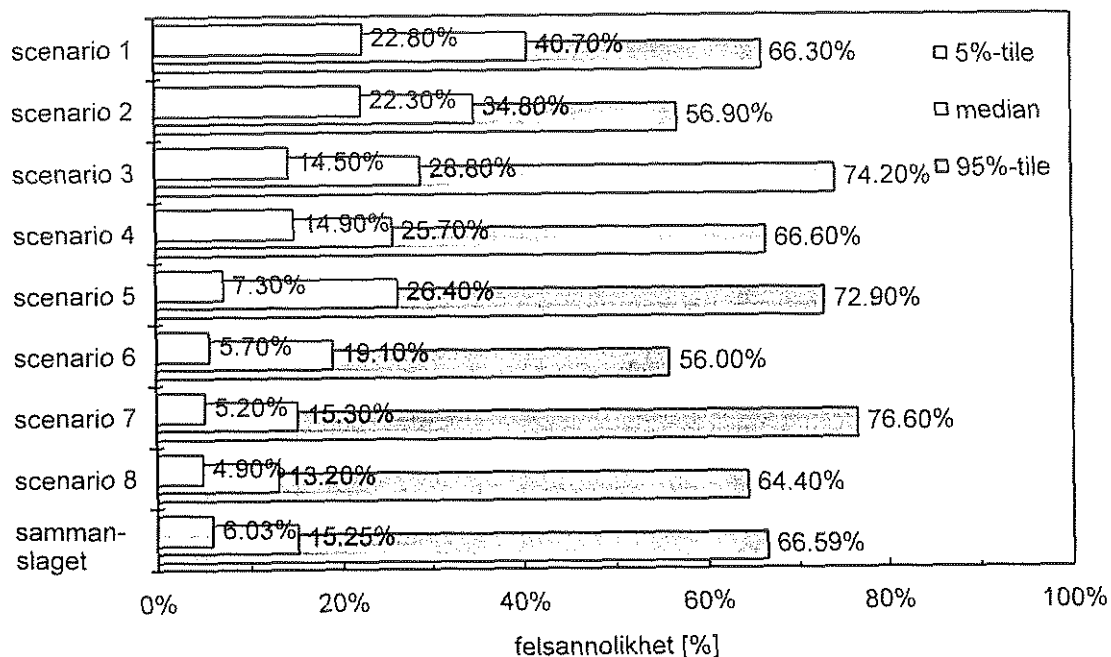
Figur 3. Säkerhetsindex för de 8 scenarierna i figur 1. AI. = automatiskt brandlarm, Sp. = sprinkler.

**Fel! Ogiltigt inbäddat objekt.**

Figur 4. Totala osäkerheten uppdelad på respektive komponents bidrag, scenario 6.

#### Metod 2 och 3, Monte Carlo-simuleringar

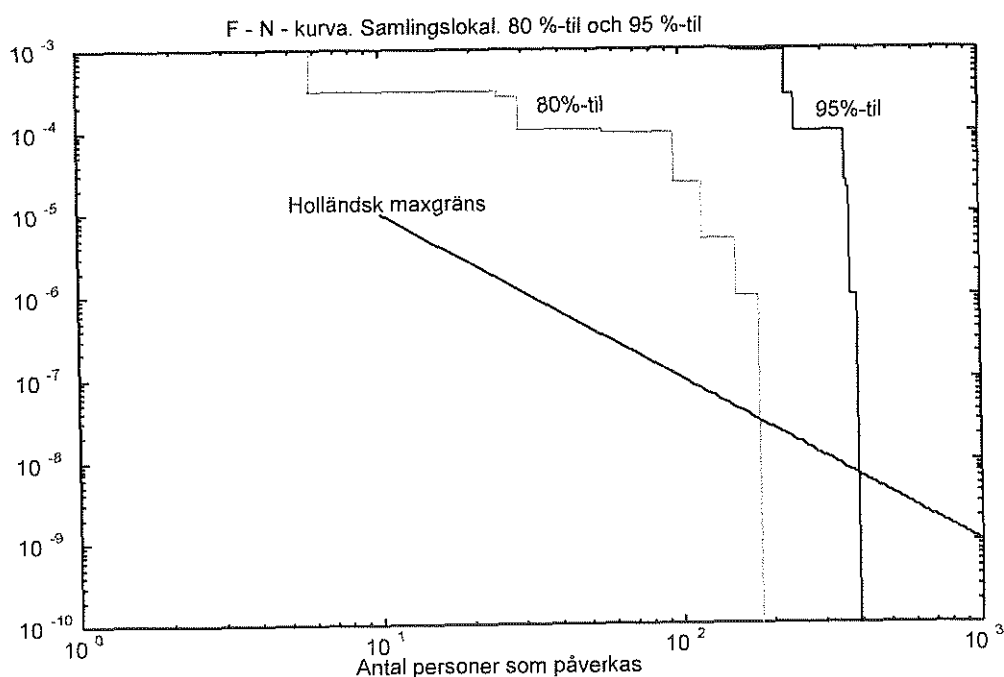
Figur 5 visar resultat från den avancerade Monte Carlo-metodiken som inte enbart ger ett punktvärde på  $P_f$  utan  $P_f$  beskrivet av en statistisk fördelning. Medelvärde och 90%-intervallet anges.



Figur 5. Felsannolikheter för de 8 scenarierna från figur 1. Medianvärde och 90% intervall.

Metod 4 och 5, Evaluering av händelsetråd

När Monte Carlo-simuleringar appliceras på händelsetrådet i Figur 1 ger varje enskild genomgång av händelsetrådet upphov till en CCDF enligt Figur 2. Genomförs simuleringen av hela trädets 1000 ggr erhålls 1000 CCDF, osv. Görs detta samtidigt som brist på nödvändig utrymmestid översätts till att ett antal personer ej hinner utrymma erhålls F/N-kurva, dvs samhällsriskerna förknippad med en viss byggnad, enligt Figur 6. Av de 1000 CCDF-kurvorna representerar den streckade kurvan 80% fraktilen. Den heldragna kurvan längre till höger representerar motsvarande 95% fraktil.



Figur 6. Samhällsriskerna för samlingslokal uttryckt som F-N-kurva.

En rad allmänna slutsatser från detta delprojekt redovisas i kapitel 10. Delprojektets stora roll var att kartlägga kunskapsbasen, undersöka olika riskanalysmetoder och exemplifiera den praktiska användningen.

## 9.2 DP2: Riskanalys av sjukhus [I4]

En riskanalys har genomförts för en vårdavdelning på ett sjukhus. Den risk som studerats är den individuella personrisken vid utrymning till följd av brand. En första ordningens metod (FOSM) har använts för att studera den individuella risken för personskada. Risken har uttryckts med hjälp av säkerhetsindex  $\beta$ , vilket kan räknas om i sannolikhet för att skadan skall uppstå. Den individuella risken är framräknad under förutsättning att en brand har inträffat och att den utvecklas så att utrymning blir nödvändig. Högre värde för  $\beta$  innebär större säkerhet och mindre risk för skada. Riskanalysen beaktar osäkerheterna i de ingående variablerna som beskriver utrymningsförloppet. Problemet har strukturerats med hjälp av händelseträdsteknik.

Utrymningsförloppet beskrivs av en gränstillståndsekvation som anger storleken för den säkerhetsmarginal som finns till förfogande vid utrymning. Marginalen anger skillnaden mellan tid till kritiska förhållanden och utrymningstid. Med tid till kritiska förhållanden avses tillgänglig utrymningstid. Kritiska förhållanden är valda enligt rådtext i BBR. Detta medför att den risk som beräknas inte anger risken att omkomma eller allvarligt skadas. Risken som beräknats, uttryckt i säkerhetsindex  $\beta$ , anger risken att utsättas för kritiska förhållanden. Beräkningarna har utförts på en vårdavdelning med mått enligt förutsättningar från tidigare byggnorm, Nybyggnadsregler.

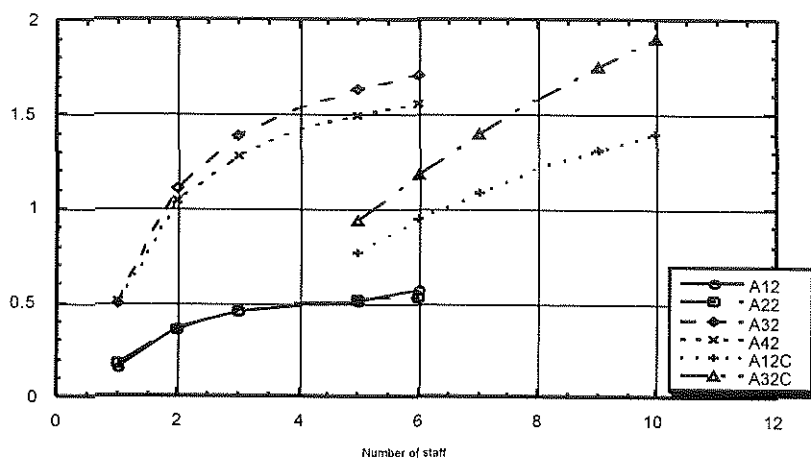
Som resultat erhålls ett mått för den individuella risken för varje slutscenari i händelseträdet.

Slutsatser från riskanalyserna är bl a följande:

- brandens utveckling är en viktig parameter
- möjligheten att kunna stänga dörren till vådrummet (automatiskt eller manuellt) är viktig
- antalet personal är viktig
- närvaron och funktionen av ett automatiskt brandlarm är viktig

För att förenkla beräkningarna har några begränsningar gjorts. Dessa har medvetet gjorts eftersom syftet med beräkningarna varit att undersöka metodernas tillämpbarhet för brand och utrymningssituationen.

Ett exempel på resultat från beräkningen visas i Figur 7. Figuren anger hur antalet vårdpersonal inverkar på säkerheten för personer på avdelningen. Den vertikala axeln anger säkerhetsindex  $\beta$  och den horisontella axeln, antalet vårdpersonal.



Figur 7. Individuell risk i vårdanläggning uttryckt som säkerhetsindex  $\beta$ . Horisontell axel anger antal personal.

Sammanfattningsvis kan man säga att metoden för individuell risk kan användas som verktyg för att beskriva risken för denna typ av byggnader. Mer detaljerade studier är dock nödvändiga för att bestämma risken mer noga.

### 9.3 DP3: Riskanalys av hotell [I5]

En riskanalys har genomförts med avseende på personsäkerheten på ett hotell. Risken som studerats är personrisken vid utrymning till följd av brand. Riskanalysen tar hänsyn till osäkerheter i variablerna som beskriver utrymningssituationen. En första ordningens metod (FOSM) använts för att studera den individuella risken för personskada. Den individuella risken har uttryckts i säkerhetsindex  $\beta$ .

Dessutom har samhällsrisken studerats. Vid beräkning av samhällsrisk tar man inte bara hänsyn till sannolikheten för den oönskade konsekvensen, utan beaktar också det antal personer som utsätts för faran. Utrymningsscenarierna har strukturerats med hjälp av händelseträdsteknik. För båda riskanalyserna förutsätts det att en brand har inträffat och att den utvecklas så att utrymning blir nödvändig.

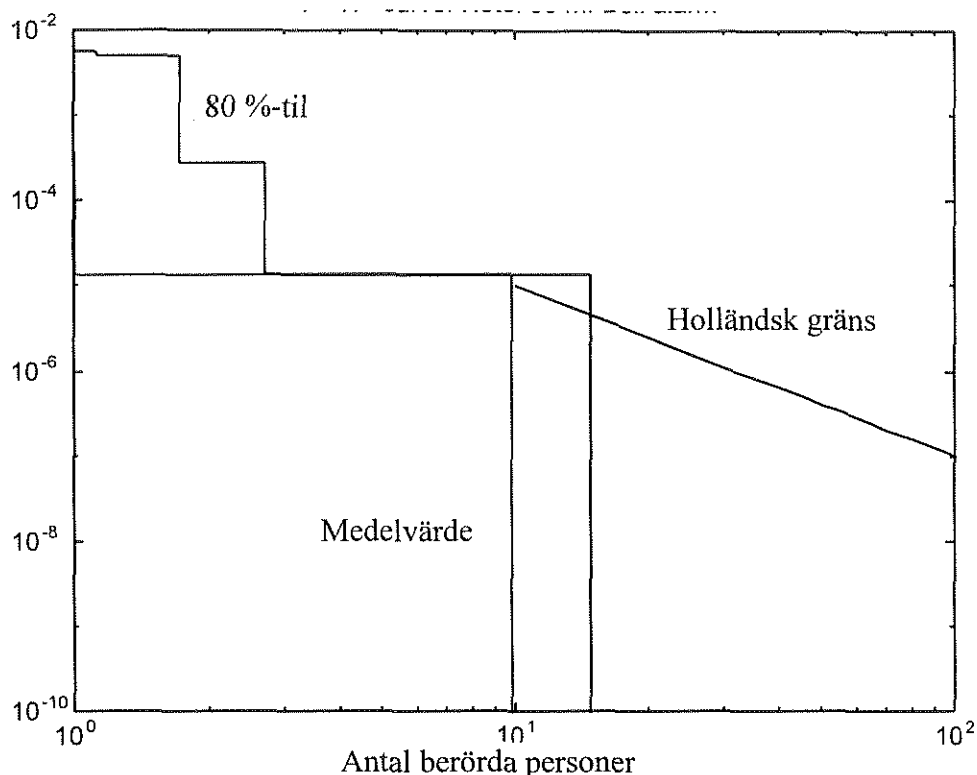
Utrymningsförloppet beskrivs av en gränstillståndsekvation som anger säkerhetsmarginalen för utrymning. Marginalen anger skillnaden mellan tid till kritiska förhållanden och utrymningstid. Kritiska förhållanden är valda enligt rådtext i BBR. Detta medför att den risk som beräknas anger risken att utsättas för kritiska förhållanden. Beräkningarna har utförts på en hotellkorridor enligt förutsättningar från tidigare byggnorm, Nybyggnadsregler.

De resultat som framkommit efter riskanalyserna är följande:

- brandens utveckling är en viktig parameter
- möjligheten att kunna stänga dörren till hotellrummet (automatiskt eller manuellt) är viktig
- funktionen av utrymningslarmet är viktig för hotellet
- närvaron och funktionen av ett automatiskt brandlarm är viktig

För att förenkla beräkningarna har några begränsningar gjorts. Dessa har medvetet gjorts eftersom syftet med beräkningarna varit att undersöka metodernas tillämpbarhet för brand och utrymningssituationen.

Figur 8 illustrerar en sk F-N-kurva som används för att beskriva samhällsrisk. Streckad linje visar medelrisken. Den vertikala axeln anger sannolikheten per år att konsekvensen är värre än givet värde på den horisontella axeln. Denna anger antalet personer som blir utsatta för kritiska förhållanden. Osäkerheten i F-N-kurvan representeras av läget för 80%-tilen för värdena.



Figur 8. Samhällsrisk i hotell uttryckt som F-N-kurva. Utrymningslarm utgörs av larmklocka. Horisontell axel anger antalet berörda personer.

Kurvan som anger acceptabel risk i Holland kompletterar bilden. Jämförelse mellan den beräknade risken och den holländska kurvan kan inte göras direkt då förutsättningarna skiljer sig åt. Sammanfattningsvis kan man säga att både metoden för individuell risk och den utökade metoden för samhällsrisk kan användas som verktyg för att beskriva risken för denna typ av byggnader. Mer detaljerade studier är dock nödvändiga för att bestämma risken mer noga.

## 9.4 DP4: Framtagande av partialkoefficienter [IK3, IK1, IK2]

### 9.4.1 Allmänt om partialkoefficienter

I avsnitten 7.1 och 7.2 skisserades hur den sk säkerhetsindexmetoden eller FOSM-metoden direkt ger de dimensionerande värden = de värden där sannolikheten att fel



eller brott uppträder är som störst. Ingångsdata är här de fullständiga statistiska fördelningarna. Beräkningsmetoden producerar alltså

- a) felsannolikhet  $P_f$  eller (ekvivalent) säkerhetsindex  $\beta$
- b) den mest sannolika punkten för att gränstillståndet = 0. Denna punkt kallas den dimensionerande punkten och har koordinaterna  $x^* = (x_1^* \dots x_n^*)$ .

Utvärdering av  $\beta$  och  $x^*$  kan ske antingen för en hel klass av byggnader med exempelvis golvhöjder  $A$  och rumshöjder  $H$  liggande inom ett visst intervall eller för en given byggnad med givet  $A$  och  $H$ . Det förstnämnda fallet gäller t ex om man vill göra en riskbedömning av en viss byggnadstyp på nationell nivå och jämföra med andra riskkällor. Här är  $A$  och  $H$  stokastiska parametrar beskrivna av vissa fördelningar. I fall två är  $A$  och  $H$  deterministiska. I en dimensioneringssituation är frågeställningen: Utgå från en given byggnad med givet  $A$  och  $H$  och en given säkerhetsnivå ( $\beta$  och/eller  $P_f$ ) och beräkna exempelvis utrymningsbredden  $W$  så att detta  $\beta$  uppnås. En metod är naturligtvis att utgå från de statistiska fördelningarna, använda FOSM-metoden och iterativt nå fram till det nödvändiga värdet på  $W$ , dvs enligt nivå 2 i avsnitt 7.2. Projektörer och myndigheter kräver emellertid en dimensioneringsmetodik som är mer transparent och lättanvänd. Den konventionella ingenjörsmetoden är då att göra dimensioneringen med utgångspunkt från  $s$   $k$  dimensionerande värden  $x_{i,d}$  valda på ett sådant sätt att vald säkerhetsnivå i genomsnitt uppnås, dvs enligt nivå 1 i avsnitt 7.1. Eftersom en dimensionerande ekvation skall gälla ett antal olika byggnader kan inte vald säkerhetsnivå uppnås i varje enskilt fall. Dimensionerande värden  $x_{i,d}$  skrivs vanligen

$$x_{i,d} = \gamma_i x_{i,ch}$$

där  $\gamma_i$  kallas partialkoefficient och  $x_{i,ch}$  är det karakteristiska värdet (vanligen 50%, 80% eller 90% fraktilen av motsvarande fördelning).

$x_{i,d}$  och  $x_i^*$  är två uttryck för samma sak, den punkt där det är mest sannolikt att gränstillståndet uppnås. Olika beteckningar används för att beräkningssituationerna skiljer:  $x_i^*$  erhålls vid en riskvärdering,  $x_{i,d}$  skall ges som indata vid en dimensionering.

En dimensioneringsanvisning skall täcka ett stort antal byggnader med stora variationsområden för  $A$  och  $H$ . Det blir därför nödvändigt härleda vektorn  $x_d = (x_{1,d} \dots x_{n,d})$  via en optimeringsprocess, som inbegriper hela detta spektrum. Förfaringssättet framgår bäst genom ett praktiskt exempel, se följande avsnitt.

#### 9.4.2 Algoritm för bestämning av partialkoefficienter

Låt oss betrakta scenario 6 i Figur 1. Gränstillståndsekvationen kan skrivas

$$G = 1.67 \alpha^{-0.26} H^{0.44} A^{0.54} M_s - 5.36 \alpha^{-0.478} H^{0.7} M_D - R - N \cdot A/(W \cdot F)$$

$$G = G(N, R, \alpha, M_D, M_s, W, \text{övriga deterministiska parametrar})$$

$G > 0$  innebär säker zon

I en dimensioneringssituation är problemet det omvända: att med utgångspunkt från angivna dimensionerande värden på  $N$ ,  $\alpha$ ,  $R$ ,  $M_D$  och  $M_S$  beräkna ett  $W$  så att en viss säkerhetsnivå  $\beta$  eller  $P_f$  erhålles. De dimensionerande värdena på  $N$ ,  $\alpha$ ,  $R$ ,  $M_D$  och  $M_S$  skall gälla för hela klassen av byggnader med olika höjder  $H$  och golvareor  $N$ . Antag att populationen av byggnader vad gäller  $H$  och  $A$  definieras av  $3 \text{ m} < H < 8 \text{ m}$ ,  $1000 \text{ m}^2 < A < 1600 \text{ m}^2$ . Väljs  $H = (3, 5, 8) \text{ m}$  och  $A = (1000, 1600) \text{ m}^2$  erhålls 6 möjliga kombinationer av  $(H, A)$ . Uppgiften är nu att fastställa

$N_d$ ,  $\alpha_d$ ,  $R_d$ ,  $M_{s,d}$  och  $M_{D,d}$

så att avvikelserna i säkerhetsnivå från ett givet  $\beta_{\text{fix}}$  minimeras över dessa 6 kombinationer. Vi förutsätter nu att  $M_E$  är lika med 1.0. Låter vi vektorn  $\bar{\gamma} = (\gamma_N, \gamma_\alpha, \gamma_R, \gamma_{M_S}, \gamma_{M_D})$  beteckna kvoten mellan dimensionerande värde och karakteristiskt värde (exempelvis 80% fraktilen) kan detta skrivas:

Bestäm vektorn  $\bar{\gamma}$  så att

$$\sum_{i=1}^6 (\beta_i(\bar{\gamma}) - \beta_{\text{fix}})^2$$

minimeras.

Uttrycket för att beräkna den sökta storheten  $W$  (dörrbredd) ges av

$$W = \frac{NA}{F} \cdot \frac{1}{1.67 \alpha^{-0.26} H^{0.44} A^{0.54} M_S - 5.36 \alpha^{-0.478} H^{0.7} M_D - R}$$

Algoritmen för att beräkna  $\bar{\gamma}$  kan nu skrivas

1. Välj utgångsvärden på  $\bar{\gamma}$  och karakteristiska värden (= specificera fraktil)
2. Lös ut de 6 olika värdena på  $W$  (deterministiskt)
3. Beräkna de 6  $\beta$ -värden enligt proceduren i avsnitt 7.1
4. Beräkna kvadratsumman av avvikelserna
5. Gå in i en optimeringsalgoritm som iterativt räknar fram den vektor  $\bar{\gamma}$  som minimerar avvikelserna
6. När de slutliga värdena på  $\bar{\gamma}$  erhållits produceras givetvis samtidigt de dimensionerande värdena

I delprojektet DP4 genomfördes ett första försök att medelst optimeringsförfarandet ovan bestämma partialkoefficienterna för variablerna  $\alpha$  och  $R$ . Resultatet blev

$$\gamma_\alpha = 1.06$$

$$\gamma_R = 2.10$$

med karakteristiska värden valda som medelvärden av resp  $\alpha$  och  $R$ . Använd genomsnittlig säkerhetsnivå motsvarande  $\beta = 1.4$ .

## 9.5 DP5: Säkerhetsnivåer i byggnader dimensionerade med traditionell metod [I3]

I detta delprojekt undersöktes personsäkerheten i byggnader dimensionerade enligt traditionell, preskriptiv metod. Följande typer av byggnader undersöktes

- diskotek utan sprinkler och larm
- diskotek utan sprinkler men med larm
- sporthall med sprinkler och larm
- kontor
- skola
- pensionärshem
- hotell

Riskberäkning skedde med FOSM-metoden, se avsnitt 7.1, med säkerhetsindex  $\beta$  och felsannolikhet  $P_f$  som utdata. Nödvändiga approximer i data och modeller medför att det beräknade, absoluta värdet på  $P_f$  är osäkert; jämförelse mellan  $P_f$  beräknat för olika byggnader och scenarier bedöms ha en avsevärt större tillförlitlighet.

Bland slutsatserna kan nämnas

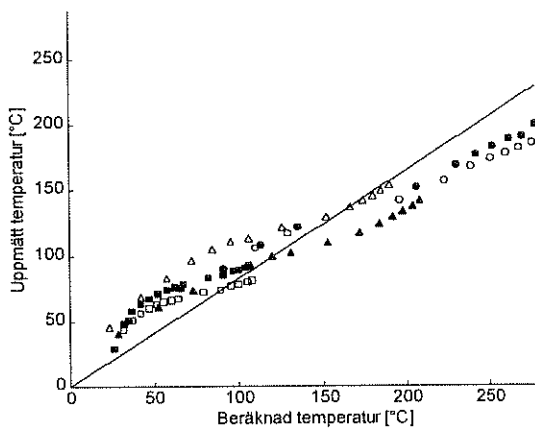
1. Personsäkerhetsnivån för byggnader dimensionerade efter preskriptiv metodik uppvisar stora variationer med en felsannolikhet mellan 0 och 90% (för det fall brand har inträffat).
2. Beräkningarna indikerar en rangordning mellan olika typer (användning) av byggnader som har stora likheter med den rangordning som framkommer ur engelsk statistik.
3. I små samlingslokaler är storleken på brandtillväxtparametern  $\alpha$  mycket viktig. Obrännbara ytbeklädnader ökar personsäkerheten väsentligt.
4.  $\alpha$  har större betydelse för byggnader utan sprinkler och alarm än för byggnader med dessa skyddssystem.
5. Personsäkerheten i samlingslokaler ökar med storleken på höjd och golvarea.
6. Stora samlingslokaler med sprinkler uppvisar hög personsäkerhetsnivå.
7. Fungerande automatiska dörrstängare är utomordentligt betydelsefulla för personsäkerheten i hotell.

Flera av slutsatserna ovan är intuitivt kända sedan länge; det viktiga är att för första gången en kvantifiering har varit möjlig.

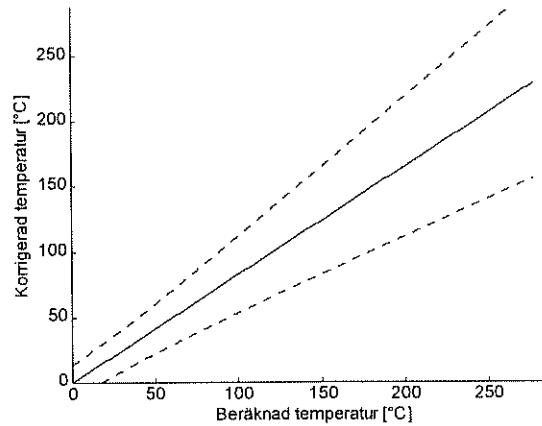
## 9.6 DP6: Osäkerheter i beräkningsmodeller för spridning av brandgas

I detta delprojektet utarbetas en metodik för att analysera osäkerheterna i resultat från simuleringsmodeller, som beräknar spridning av brandgas. Projektet består av två olika huvuddelar. I den första delen organiseras en databas med experimentella mätdata från fullskaleförsök. I den andra delen skapas en statistisk modell för att bestämma osäkerheten i modeller som simulerar spridning av brandgaser. Med kunskap om modellosäkerhet kan korrigering av modellfel göras vid tex dimensionerings beräkningar. I projektet används simuleringsmodellen CFAST för att visa hur osäkerheterna i en simuleringsmodell kan kvantifieras. Osäkerheterna i en modell som beräknar spridning av brandgaser varierar beroende på den geometriska planlösningen och på flödesförhållandena. Det är orealistiskt att försöka bestämma en generell modellosäkerhet för en hel modell, gällande för alla scenarier. Osäkerheter i bestämning av modellfelet skulle bli orimligt stor och ingen praktisk användbar korrektion av simuleringsresultaten skulle vara möjlig. Genom att definiera och beräkna modellosäkerheten för ett begränsat antal vanligt förekommande scenarier, ges möjlighet att korrigera för modellfelen.

Den statistiska modellen beräknar osäkerheten för ett specifikt scenario, dvs en samling försök som har liknade geometrisk planlösning och flödesförhållanden. Modellosäkerheten bestäms genom sk linjär regression, dvs sambandet mellan experiment och simuleringar antas vara linjärt.



Figur 9. Regression mellan uppmätt och simulerad temperatur



Figur 10. Regressionslinje och 95 %-igt prediktionsintervall

I Figur 9 plottas data och regressionslinje för ett specifikt scenario. Figuren visar att det linjära sambandet:

$$T_m = \gamma T_p$$

$T_m$  = Experimentellt uppmätt temperatur,  $\gamma$  = regressionskoefficient,  $T_p$  beräknad temperatur

inte fullständigt beskriver förhållandet mellan variablerna. Det sker ingen konstant under eller överskattning av den experimentellt uppmätta temperaturen. Eftersom  $T_m/T_p$ , dvs  $\gamma$ , varierar under ett och samma försök och mellan olika försök inom samma scenario, kan inte regressionskoefficienten beskrivas deterministiskt, dvs med ett enda värde. Regressionsanalysen resulterar i att  $\gamma$  uttrycks som en stokastisk variabel,  $\gamma \in N(\gamma, \sigma)$ . När modellosäkerheten är kvantifierad för ett scenario finns möjlighet att beräkna ett korrektionsuttryck. Korrektionsuttrycket mellan olika scenarier skiljer sig ibland högst väsentligt. Hur justering för modellfelet skall göras beror på vilken typ av beräkning som utförs.

I projektet redovisas underlag för att ta fram korrektionsuttryck för de fem scenariotyper som utvärderats. Medelvärde och standardavvikelse för regressionskoefficienten, som används vid uppskattning av modellfelet vid temperaturberäkningar, blir för de fem scenarierna: rumsbrand (0.7, 0.05), spridning av brandgaser från rum till större lokal (0.8, 0.09), rumsbrand med flera anslutande rum (0.8, 0.05), (0.8, 0.05) resp (0.7, 0.04) för de respektive rummen. Det motsvarar en genomsnittlig överskattning av temperaturen med mellan 25-40%.

Vid en allmän osäkerhetsanalys är  $\gamma$  och  $\sigma$  de relevanta karaktäristika. Vid en praktisk beräkning i dimensioneringssammanhang är den relevanta frågan i stället: När jag med modellen räknar fram exempelvis en brandgastemperatur, vilket värde skall väljas så att jag är 95% säker att jag valt ett konservativt värde? Med andra ord: Hur stort är det 95% prediktionsintervallet? Standardformler från statistiken ger svaret och ett sådant intervall ges i Figur 10 för ett specifikt scenario. För en beräknad gastemperatur av 150°C är det 95%-iga prediktionsintervallet 70-170°C. Vilket värde som är konservativt beror på omständigheterna. Intervallets övre gräns ger resultat på den säkra sidan vid beräkning av exponeringsnivåer, på osäkra sidan vid beräkning av aktiveringstemperaturer för exempelvis sprinkler. I det senare fallet bör alltså den undre gränsen väljas för att få ett konservativt värde.

## 9.7 DP7: Osäkerheter i indata [I6]

I detta delprojekt beskrivs relativt utförligt osäkerheters roll för den slutliga dimensioneringen. Både dimensionering enligt metod med säkerhetsindex  $\beta$  och enligt händelseträdsmetoden beskrivs. Rapporten är uppdelad i följande delavsnitt: osäkerheters allmänna roll, metoder att identifiera osäkerheter, metoder att kvantifiera osäkerheter, metoder att fortplanta osäkerheter genom ett system, metoder att analysera osäkerheters inverkan på det slutliga riskresultatet, osäkerheter och dimensionering. I rapporten ingår en omfattande referenslista över studier där osäkerheter har kartlagts och kvantifierats.

Med "osäkerheter" avses här dels funktionssäkerhet eller tillförlitlighet ("reliability") hos olika skyddssystem som sprinkler och kontrollsystem för brandgas, dels osäkerheter i indata som brandtillväxtkurvor, mänskligt uppträdande, etc. Baserat på den kategorisering av indata som görs bl a i ISO-dokumenten har följande indelning gjorts

- A modellosäkerhet
- B persontätheter
- C mänskligt uppträdande
- D skyddssystem
- E brandtillväxt, brandinitiering
- F yttre miljö
- G organisatoriska aspekter (management)

Kategori D delas in i följande grupper: D1 detektionssystem, D2 kontrollsystem för brandgas, D3 släcksystem och D4 passiva system.

Det är inte möjligt att inom ramen för ett enstaka delprojekt genomföra den datainsamling och dataanalys av den storleksordning som krävs. Arbetet bedrivs därför huvudsakligen inom ramen för en internationell grupp CIB/W14 Subgroup on Uncertainty Analysis med projektledaren som ordförande.

Rent praktiskt har arbetet inom delprojektet bildat basen för den kvantifiering av olika osäkerheter som krävts inom delprojekten DP1-DP5.

## 10. Val av dimensionerande brandscenario

Val av dimensionerande brandscenario är ett kärnproblem vid brandteknisk dimensionering byggd på beräkningar, se kapitel 2. Metodiken bygger på att analysera ett eller flera speciella brandförlopp och med ledning av den analysen dra slutsatser beträffande skyddsnivån för byggnaden. Begreppet "dimensionerande brand" involverar en beskrivning av brandinitiering, brandtillväxt och brandsläckning tillsammans med de spridningsvägar som är möjliga under de specificerade förutsättningarna. Viktiga faktorer inkluderar

- storlek och typ av antändningskälla
- brandbelastning, typ och fördelning
- inomhusventilation
- effektivitet och tillförlitlighet hos olika skyddssystem
- öppningar; fönster, dörrar, etc

Typiska scenarier inkluderar bränder i möbler och annan inredning, bränder i ytmaterial, takbränder (under och ovanför yttertak), bränder i hållrum. Både frekvenser och konsekvenser bör utvärderas. Mängder av statistiska data existerar, framförallt från utlandet.

Ett sätt att omsorgsfullt välja dimensionerande brand är att göra urvalet riskbaserat. Låt oss betrakta utrymning av samlingslokal enligt Figur 1. Med vissa förutsättningar erhålls för de åtta scenarierna följande kombinationer av sannolikhet och händelseutfall (konsekvens): (0.001, 24), (0.004, 7), (0.019, 2), (0.076, 0), (0.009, 3), (0.036, 1), (0.171, 0), (0.684, 0), där konsekvenserna mäts i antalet personer som ej hinner utrymma. Definieras risk som produkten av sannolikhet och konsekvens erhålls risk = (24, 28, 38, 0, 27, 36, 0, 0) · 10<sup>-3</sup>/inträffad brand. "Farligaste" scenario är alltså nummer 3 räknat uppifrån.

Förutom vägledning vid val av dimensionerande brandscenario ger den beskrivna metodiken en värdefull sammanfattning av riskprofilen och kan tjäna som utgångspunkt för val av riskreducerande åtgärd.

Vid ovanstående riskberäkning har bortsetts från begreppet riskaversion, dvs att 1 brand som resulterar i 24 dödsfall (scenario 1) alltid kommer att bedömas allvarligare än 36 bränder som resulterar i 1 dödsfall (scenario 6).

## 11. Summering

### 11.1 Allmänt

När projektet startades var det av verklig pionjärkaraktär och den erforderliga kunskapsbasen fick byggas upp mer eller mindre från noll. Inte onaturligt visade sig den ursprungliga tidsplaneringen vara för optimistisk. En jämförelse med området bärande

konstruktioner är här på sin plats. Forskargrupper världen över arbetade i en tjugofemårsperiod för att åstadkomma konstruktionsregler exemplifierade av BKR 94. De resultat som rapporterats i denna rapport får ses mot denna bakgrund liksom mot det faktum att interaktionen brand/byggnad/människa är åtskilligt mer komplex.

Allmänt gäller att det redovisade projektet har visat sig influera den internationella utvecklingen på ett möjligtvis avgörande sätt.

## 11.2 Några huvudsakliga resultat från forskningssynpunkt

1. Projektet har påvisat kopplingen mellan riskanalysmetoder från andra ingenjörsområden och riskanalys av byggnadsbränder.
2. Två huvudmetoder har framträtt: metoden med säkerhetsindex  $\beta$  där riskberäkningen kan grunda sig på enstaka analytiskt uttryck, kvantitativ riskanalys av händelsesträd för system med mer än ett scenario.
3. Det har generellt demonstrerats att, för en specificerad byggnad och specificerat scenario,  $\beta$ -metoden kan användas för att bestämma dimensionerande indata så att föreskriven säkerhetsnivå realiserar.
4. För ett scenario och en klass av byggnader, dimensionerande värden kan erhållas via optimeringsstudier.
5. Det har påvisats att den traditionella, preskriptiva dimensioneringsmetoden kan medföra mycket olika (och odefinierade) säkerhetsnivåer.
6. Modeller osäkerheter har kvantifierats för den mest använda datormodellen

## 11.3 Resultat för projektörsledet

1. Färdiga dimensioneringssamband har för en viktig byggnadstyp härletts för utrymningsförloppet.
2. För de tre huvudtyper av byggnader som studerats har massiva mängder data härletts vad gäller hur säkerhetsnivån varierar med skyddssystem, byggnadsutformningar och övriga parametrar som personaltäthet.
3. Dessa data ger underlag för bedömningar hur ekvivalenta säkerhetsnivåer kan erhållas för olika skyddssystem och därmed olika investeringskostnader.