

# **Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar**

*Fredrik Nystedt*

*Håkan Frantzich*

---

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

Brandteknik och riskhantering  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet

Report 3160, Lund 2011

Rapporten har finansierats av nationella brandsäkerhetsgruppen, NBSG



# **Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar**

**Fredrik Nystedt  
Håkan Frantzich**

**Lund 2011**

**Guide on quality assurance in fire safety analysis work for Swedish nuclear power plants**  
**Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar**

Fredrik Nystedt

Håkan Frantzich

**Report 3160**

**ISSN: 1402-3504**

**ISRN: LUTVDG/TVBB-3160-SE**

Number of pages: 83

**Keywords:** Fire safety, nuclear power plant, quality assurance

**Sökord:** Brandsäkerhet, brandskydd, kärnkraftverk, kärnteknisk anläggning, kvalitetssäkring

**Abstract:** The report provides guidance on how to assure quality in fire safety analysis reports. The primary focus is on analyses in nuclear power plants but the report can also be used for other applications as the information can be seen as generic. The report provides a procedure to follow and targets at analytical fire safety engineering analyses. The report assumes that the reader is familiar with the basic concepts of fire safety issues. The quality guide focuses on the use of Fire Dynamic Simulator (FDS) as the main software but others are also included in the discussion on the applicability when choosing the relevant software for the specific task.

© **Copyright:** Dept. of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, 2011.

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

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

Telefon: 046 - 222 73 60

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

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

Telephone: +46 46 222 73 60

## **Förord**

Rapporten utgör redovisning i projektet ”Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar - NBSG projekt 26#04”. Projektet är finansierat av den nationella brandsäkerhetsgruppen (NBSG) som är en samarbetsorganisation där representanter för de svenska kärnkraftsanläggningarna, Strålsäkerhetsmyndigheten och Svensk Kärnbränslehantering AB ingår. Gruppens arbete ska leda till samordningsvinster på brandsäkerhetsområdet genom att gemensamt finansiera forskning, tester, informationsspridning mm.

Projektet är utfört under tiden 2009 till 2011 och har presenterats vid NBSGs seminarier samt i föreliggande rapport. Projektet har letts av Håkan Frantzich (LTH) och kontaktperson från NBSG var Tommy Magnusson, Vattenfall AB.



## Sammanfattning

I samband med att brandtekniska analyser ska utföras vid de svenska kärntekniska anläggningarna är det väsentligt att redovisningen av dessa utförs på ett sådant sätt så att målsättningen kan visas vara uppfylld. Detta ställer krav på att analysen utförs på ett sådant sätt att resultaten är spårbara, att rätt metod används och att slutsatserna kan beläggas utifrån den utförda analysen. För att underlätta ett sådant arbete kan kvalitetsmanualen användas som stöd.

En brandteknisk analys består schematiskt av följande steg:

- Problemformulering med förutsättningar, mål, syfte och avgränsningar.
- Definition av scenarier, skademål och skadekriterier
- Val av metod och verktyg (beräkningsmodell)
- Beräkning av brandförlopp och konsekvens av detta
- Insamling av indata för bestämning av frekvens och konsekvens
- Värdering av resultat inklusive rekommendationer
- Känslighets- och osäkerhetsanalys
- Dokumentation och kontroll

Inom ramen för ovanstående steg är det väsentligt att arbetat präglas av

- Relevans
- Spårbarhet
- Validitet och reliabilitet
- God hantering av osäkerheter
- Relevant kontroll av analysen

Rapporten presenterar begränsningar vid användning av några av de vanligaste beräkningsmodellerna för brandtekniska analyser. Mycket av detta arbete fokuserar dock på modellen FDS eftersom denna är vanlig i sammanhanget. Som ett resultat av denna värdering kan det konstateras att dagens beräkningsmodeller är mindre bra på att beskriva brandförlopp som sker under syrebegränsande förutsättningar. Just sådana förutsättningar kan vara vanliga inom kärnkraftsindustrin. Rapporten innehåller även en checklista för att bedöma om beräkningar med FDS följer god praxis inom området.





# Innehållsförteckning

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Inledning.....</b>                                                     | <b>11</b> |
| 1.1 Bakgrund .....                                                          | 11        |
| 1.2 Mål och syfte .....                                                     | 11        |
| 1.3 Avgränsningar .....                                                     | 11        |
| 1.4 Allmänt om brandanalyser och kvalitetsbegreppet .....                   | 11        |
| 1.4.1 Kvalitetsbegrepp .....                                                | 12        |
| 1.4.2 Krav .....                                                            | 12        |
| 1.5 Metoder för brandtekniska analyser .....                                | 13        |
| 1.6 Termer och begrepp .....                                                | 14        |
| 1.7 Läsanvisning .....                                                      | 16        |
| <b>2 Arbetsgång för brandtekniska analyser .....</b>                        | <b>17</b> |
| 2.1 Steg 1: Definiera analysens målsättning .....                           | 18        |
| 2.2 Steg 2: Beskriv brandscenarier .....                                    | 19        |
| 2.2.1 Identifiering av möjliga brandscenarier .....                         | 19        |
| 2.2.2 Brandscenariokategorier .....                                         | 21        |
| 2.2.3 Representativa brandscenarier .....                                   | 22        |
| 2.3 Steg 3: Välj brandmodell .....                                          | 23        |
| 2.3.1 Handberäkning .....                                                   | 25        |
| 2.3.2 Tvåzonsmodeller (CFAST) .....                                         | 26        |
| 2.3.3 Fältmodeller (FDS) .....                                              | 28        |
| 2.3.4 Övriga modeller .....                                                 | 31        |
| 2.3.5 Verifiering och validering .....                                      | 31        |
| 2.4 Steg 4: Beräkna brandförloppet .....                                    | 34        |
| 2.5 Steg 5: Värdera resultatet .....                                        | 35        |
| 2.6 Steg 6: Känslighets- och osäkerhetsanalys .....                         | 35        |
| 2.7 Steg 6: Dokumentation .....                                             | 36        |
| 2.8 Steg 7: Granskning (kontroll) .....                                     | 37        |
| 2.8.1 Egenkontroll .....                                                    | 37        |
| 2.8.2 Tredjepartskontroll .....                                             | 38        |
| <b>3 Vägledning vid modellering av brandscenarier .....</b>                 | <b>41</b> |
| 3.1 Krav och målsättningar .....                                            | 41        |
| 3.2 Karakterisering av modelleringsscenarier .....                          | 41        |
| 3.3 Beräkningsstrategier och brandmodellers lämplighet .....                | 42        |
| 3.3.1 Allmänt om beräkningsstrategier .....                                 | 44        |
| 3.3.2 Brandmodellernas lämplighet .....                                     | 45        |
| 3.4 Vägledning vid beskrivning av brandscenarier .....                      | 46        |
| 3.4.1 Tändkälla (dvs. branden) .....                                        | 46        |
| 3.4.2 Objekt .....                                                          | 47        |
| 3.4.3 Annat brännbart material .....                                        | 47        |
| 3.4.4 Rumsgeometri: Endast ett rum .....                                    | 47        |
| 3.4.5 Rumsgeometri: Flera rum, horisontellt eller vertikalt förbundna ..... | 48        |
| 3.4.6 Rumsgeometri: Komplicerad .....                                       | 48        |
| 3.4.7 Material i omslutande konstruktioner .....                            | 48        |
| 3.4.8 Naturlig ventilation: Vertikala öppningar .....                       | 48        |
| 3.4.9 Naturlig ventilation: Läckageytor .....                               | 48        |
| 3.4.10 Naturlig ventilation: Horisontella öppningar .....                   | 48        |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.11 Mekanisk ventilation .....                              | 49        |
| 3.4.12 Detektoregenskaper .....                                | 49        |
| 3.5 Ventilationskontrollerade bränder .....                    | 49        |
| <b>4 Indata till brandtekniska analyser .....</b>              | <b>55</b> |
| 4.1 Exempel på skadekriterier .....                            | 55        |
| 4.1.1 Elektrisk utrustning .....                               | 55        |
| 4.1.2 Byggnadsdelar .....                                      | 55        |
| 4.1.3 Personer .....                                           | 56        |
| 4.2 Exempel på brandförlopp .....                              | 58        |
| 4.2.1 Brand i elskåp i kontrollrum .....                       | 58        |
| 4.2.2 Brand i elskåp i ställverksrum .....                     | 59        |
| 4.2.3 Brand i smörjolja i pumprum .....                        | 60        |
| 4.2.4 Brand i papperskorg i kabelrum .....                     | 61        |
| 4.2.5 Brand i smörjolja i turbinbyggnaden .....                | 61        |
| 4.2.6 Transient brand i korridor .....                         | 62        |
| 4.2.7 Kabelbrand .....                                         | 63        |
| 4.3 Materialegenskaper .....                                   | 64        |
| 4.3.1 Värmeledningsegenskaper .....                            | 64        |
| 4.3.2 Förbränningsegenskaper .....                             | 64        |
| <b>5 Specifikt om Fire Dynamics Simulator (FDS) .....</b>      | <b>65</b> |
| 5.1 Versionshistorik .....                                     | 65        |
| 5.2 Uppbyggnad och användningsområde .....                     | 65        |
| 5.3 Allmänna begränsningar .....                               | 67        |
| 5.3.1 Branden och dess effektutveckling .....                  | 67        |
| 5.3.2 Förbränningsmodellen .....                               | 67        |
| 5.3.3 Beräkningsdomänen .....                                  | 69        |
| 5.3.4 Vattensprinklersystem .....                              | 70        |
| 5.4 Validering .....                                           | 71        |
| 5.4.1 Övre brandgaslagrets temperatur och höjd .....           | 71        |
| 5.4.2 Temperaturen i takstrålen .....                          | 71        |
| 5.4.3 Plymtemperatur .....                                     | 71        |
| 5.4.4 Flamhöjd .....                                           | 72        |
| 5.4.5 Koncentration av syrgas och koldioxid .....              | 72        |
| 5.4.6 Sotkoncentration .....                                   | 72        |
| 5.4.7 Tryck i brandrummet .....                                | 72        |
| 5.4.8 Värmestrålning och temperatur på mottagande objekt ..... | 72        |
| 5.4.9 Värmeflöde i väggar och väggtemperatur .....             | 73        |
| 5.5 Vägledning för kvalitetssäkring .....                      | 73        |
| 5.5.1 Brandens och dess effektutveckling .....                 | 73        |
| 5.5.2 Förbränningsmodellen .....                               | 75        |
| 5.5.3 Värmestrålning .....                                     | 75        |
| 5.5.4 Beräkningsdomänen .....                                  | 75        |
| 5.5.5 Materialdata .....                                       | 77        |
| 5.5.6 Vattensprinklersystem .....                              | 78        |
| 5.5.7 Utdata .....                                             | 78        |
| 5.6 Checklista .....                                           | 80        |
| <b>6 Referenser .....</b>                                      | <b>81</b> |

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Brandanalysen är en av de säkerhetsanalyser som ska utföras i kärntekniska anläggningar. Analyserna kan t ex handla om hur skydd av strukturer, system och komponenter kan lösas med hjälp av andra lösningar och metoder än de som vanligen används. Dessa andra lösningar och metoder kan ge ett lika gott skydd som traditionellt godtagbara preskriptiva lösningar. För att kunna tillgodoräkna nyttan av dessa alternativa lösningar förutsätts i grunden att kravnivån definieras med så kallade funktionsbaserade föreskrifter. Dessa beskriver snarare vad skyddet ska uppnå istället för att ange godtagbara lösningar. Även inom det kärntekniska området sker en förändring av föreskrifter för bl a brandskydd mot att bli mer funktionsbaserade. Den fundamentala skillnaden mellan preskriptiva och funktionsbaserade föreskrifter är främst att för de senare ska utföraren explicit visa att skyddet är tillräckligt för att uppfylla föreskrifterna. En preskriptiv dimensionering består i princip enbart av att visa att den godtagbara lösningen är genomförd vilket implicit innebär att skyddet är godtagbart.

Verifiering av brandsäkerheten gentemot en funktionsbaserad kravnivå innebär ofta användning av avancerade beräkningar med t.ex. s.k. CFD-modeller (Computational Fluid Dynamics). För att kunna granska om den brandtekniska verifieringen uppfyller de krav som kan ställas behövs verktyg som gör detta möjligt. Dessa verktyg ger också en gemensam struktur för hantering av de brandtekniska problemen.

## 1.2 Mål och syfte

Projektets målsättning är att utveckla en kvalitetsmanual som både utförare och granskare kan använda vid brandtekniska analyser, vilka utförs inom ramen för de säkerhetsanalyser som har ålagts tillståndshavarna. Syftet med projektet är att underlätta tillståndsgivarens granskning av analyser samt bistå aktörerna med anvisningar och tolkningar av begrepp som hög kvalitet och spårbarhet vid brandteknisk analys.

## 1.3 Avgränsningar

Den brandtekniska analysen innehåller ett stort antal analyssteg. Att ta fram en kvalitetsmanual som täcker alla delområden skulle vara ett omfattande arbete. Därför avgränsas detta arbete till att gälla kvalitetssäkring av de brandfysikaliska beräkningarna. Inom svensk kärnkraftsindustri används i första hand programkoden FDS varför detta arbete lämpligen fokuseras till kvalitetsaspekter kopplade till denna kod.

Det förutsätts vidare att användaren av manualen har tillräcklig kunskap om förutsättningarna för att utföra brandanalyser inom svenska kärntekniska anläggningar. Sådan kunskap är nödvändig för att kunna göra bedömningar t ex angående val av scenarier mm och denna manual tar därför inte upp alla detaljförutsättningar så att andra förutsättningar skulle vara överflödiga. Vissa grundläggande begrepp behandlas dock för att ge en översiktlig förståelse för problematiken i denna typ av anläggningar.

## 1.4 Allmänt om brandanalyser och kvalitetsbegreppet

Resultaten från brandtekniska analyser används ofta som ett av underlagen i en beslutsprocess. Ibland fattas beslut enbart baserat på dessa resultat. För att kunna fatta rätt beslut är det därför ytterst viktigt att analyserna är av hög kvalitet. Det finns ett antal svårigheter som kan påverka analysernas kvalitet. Davidsson m.fl. (2003) listar några av dessa för riskanalyser i allmänhet och de som är relevanta för brandanalyser återges nedan:

- ♦ Data som används för att kvantifiera risker är ofta inte helt relevanta i förhållande till den specifika situationen som undersöks i analysen.

- ♦ Riskanalyser kan vara mycket resurs- och tidskrävande vilket kan leda till att ett antal förenklingar och antaganden behöver göras.
- ♦ Modellering kan vara alltför förenklad jämfört med omvärldens komplexitet (svårighet och förenklingar vid modellering av olycksförlopp och konsekvenser, begränsningar i beräkningsmodeller, etc.)
- ♦ Förenklingar och antaganden som görs för att underlätta modellering och bedömning av vissa skadehändelser kan vara lämpliga för ett antal förhållanden, men helt olämpliga för en specifik situation som ska undersökas

De finns flera faktorer som påverkar kvaliteten i riskanalysens olika faser (planering, riskidentifiering, olycksmodellering, uppskattning av frekvenser och konsekvenser, värdering, dokumentation, osv.). Framförallt påverkar fel som görs under de första analysstegen ofta i stor omfattning analysens fortsatta förlopp och kan leda till stora fel i resultaten. Exempelvis är uppskattningen av frekvenser och konsekvenser för olyckor baserad på vilka risker som har identifierats och hur identifierade risker har modellerats. Detta medför att analysresultaten måste hanteras varsamt, framförallt vid jämförelse med andra analysresultat som skapats under andra förutsättningar.

Brandanalysen tillhör faser ”uppskattning av olyckskonsekvenser” och de faktorer från andra faser som påverkar analysens kvalitet omfattas inte av detta dokument. Faktorer som påverkar kvaliteten vid genomförande av en brandanalys är bl.a. beskrivningen av ursprungshändelsen, data som används, använda modeller, beräkningsprogram, avgränsningar, nödlägesförberedelser och beskrivning av maximala konsekvenser.

#### 1.4.1 Kvalitetsbegrepp

Kvalitet definieras som alla sammantagna egenskaper hos ett objekt eller en företeelse som ger dess förmåga att tillfredsställa uttalade och underförstådda behov (SS-ISO 8402: 1994). Brandanalyser utgör ofta del i beslutsunderlag. Därför är det viktigt att beslutsfattarna kan förstå och lita på analysens innehåll och resultat. Brandanalysens kvalitet återspeglas i analysens användbarhet, dvs. i vilken omfattning den uppfyller formulerade målsättningar och krav. Principiellt kan analysens kvalitet anses vara bra om analysen återspeglar verkligheten, något som i riskanalyser fall är att betrakta som svårt att mäta. Davidsson (2003) anger därför att analysens kvalitet anses som bra när dess resultat reflekterar användning av lämpliga metoder för identifikation av skadefall och riskbedömning samt ändamålsenlig användning av information om verksamheten och dess placering, tydlig och korrekt dokumentation av analysresultat och deras bakgrund.

#### 1.4.2 Krav

I detta avsnitt redovisas de huvudsakliga motiven till att göra brandanalyser utifrån de krav som finns i exempelvis SSM 2008:17 (14 §). Anledningen till att en brandanalys görs varierar och med denna variation ställs också ibland olika krav på analysens genomförande. Brandanalyser utgör en del av de säkerhetsredovisningar som tillståndshavarna är ålagda att utföra enligt krav i t ex SSMFS 2008:1. Enligt föreskriften ska händelsen brand behandlas som en inledande händelse, och detta innebär att händelsen brand ska händelseklassas. En säkerhetsanalys bör generellt hålla hög kvalitet vad gäller dokumentation, referenser, granskningsrutiner mm:

- ♦ Analysens *syfte* bör tydligt anges liksom de *osäkerheter* och *begränsningar* som föreligger för den.
- ♦ Analysen bör vidare ha god *spårbarhet* och väl *motiverade* antaganden och data som är *relevanta* för anläggningen.
- ♦ Resultatredovisningen bör innehålla en tydlig *slutsats* om anläggningens säkerhet inom ramen för analysens *förutsättningar* och *begränsningar*...”

I föreskriften SSMFS 2008:1 anges att de modeller, metoder och data som används för att fastställa konstruktions- och driftgränser skall vara validerade och förekommande osäkerheter beaktade.

Kvalitetskraven på en brandanalys berör dess relevans, redovisning, osäkerhet och granskning (kontroll). Arbetsgången som presenteras i denna kvalitetsmanual (se kapitel 2) omfattar dessa aspekter och kan användas som vägledning och stöd för att uppnå att brandanalysen ska få en god kvalitet.

Det bör påpekas att krav på byggnader och övriga anläggningar inom det kärntekniska området också ställs av andra myndigheter t ex Boverket och Arbetsmiljöverket. I dessa myndigheters föreskrifter kan ytterligare krav och vägledning ges gällande utformning av brandtekniska analyser.

## 1.5 Metoder för brandtekniska analyser

Verifiering av olika brandskyddslösningar handlar i grunden om att på något sätt hantera de osäkerheter som finns. Osäkerheterna finns bl a i indata som till exempel hur snabbt en brand tillväxer i ett givet utrymme och i modellens förmåga att beskriva exempelvis strålningsnivåer mot kablar för en given brandeffekt. Verifieringen har som målsättning att med olika metoder visa att sannolikheten att en brand ger sådana konsekvenser att exponeringskriterier överskrids. Det bör även nämnas att det finns osäkerheter även för dessa kriterier t ex vilken temperatur som kablar tål innan de inte längre kan upprätthålla sin funktion.

Historiskt sett har olika verifieringsmetoder utvecklats vilka alla syftar till att ge en tillfredsställande låg sannolikhet för fel. För att strukturera metoderna kan beskrivningen i Paté-Cornell (1996) vara vägledande. I referensen anges sex olika nivåer för hantering av osäkerheter från att i princip enbart konstatera att det finns en fara (Level 0) till en sofistikerad kvantitativ riskanalys inkluderande en explicit osäkerhetsanalys vilket i princip innebär att osäkerheter i andra ordningen inkluderas (Level 5). I praktiken är det två av nivåerna som kan vara tillämpbara och dessa är

- scenarioanalys (Level 2) och
- kvantitativ riskanalys (Level 4)

Scenarioanalysen utgår från att anläggningen utsätts för ett antal representativa scenarier som ska spegla ett sk troligt värsta fall. Det betyder att analysen utgår från konservativ syn på vilka scenarier som kan uppstå för att på det viset förvissa sig om att med rimlig trolighet täcka in de scenarier som kan tänkas uppstå. Dessa scenarier kallas ibland för dimensionerande scenarier. Analysen hanterar inte osäkerheterna direkt utan indirekt genom valet av värden som ska ingå i analysen, dvs de ligger vanligen på "säkra sidan" med syfte att ge ett resultat som också det ligger på "säkra sidan". Ett problem med denna metod är att det finns en möjlighet att den föreslagna lösningen blir alltför konservativ och att den därför inte blir kostnadseffektiv. Fördelen är att metoden är öppen och tydlig och är inte onödigt komplicerad att genomföra. Scenarioanalysens resultat är ett konstaterande att de bestämda scenarierna kan hanteras med den föreslagna skyddsstrategin.

En mer noggrann analys av brandsäkerheten kan erhållas som ett resultat av en kvantitativ riskanalys. Denna utgår från ett probabilistiskt angreppssätt där händelser beskrivs med en sk trippel:

- vad kan hända?
- hur troligt är det?
- vad blir konsekvensen om det inträffar?

Även i detta fall måste olika scenarier tas fram men även en koppling till sannolikheten för den ingår direkt i analysen. Exempelvis kan olika brandförlopp ingå i analysen och vart och ett av

dem beskrivs även med en sannolikhet för att det ska inträffa. Som ett slutresultat kommer resultatet av analysen att ge svar på frågan om hur troligt det är att brandskyddet med den föreslagna skyddsstrategin inte klarar av att uppfylla den definierade kravnivån.

Vid en närmare betraktelse kan det konstateras att det finns ett släktskap mellan metoderna. Det som skiljer är på vilket sätt som sannolikheten (eller frekvensen) för en händelse ingår i analysen, implicit eller explicit. Eftersom scenarioanalysen av historisk tradition varit den vanligaste metoden färgar det även fortsättningen av rapporten. Men principerna för hur en brandteknisk verifiering gentemot funktionsbaserade föreskrifter ska genomföras är likartade oavsett metoden.

## 1.6 Termer och begrepp

Liksom inom alla tillämpningsområden när olika ingenjörsområden möts förekommer otydligheter i begrepp och definitioner. Detta gäller även det kärntekniska området då det förekommer bindande föreskrifter som har olika ursprung. Föreskrifter kan ha ett syfte som inte primärt är inriktat mot brandskydd och de kan dessutom vara utgivna i andra länder med annan tradition gällande brandskydd. Utgångspunkten för analysen är hur oberoenden mellan anläggningens säkerhetsfunktioner ska upprätthållas. Då detta kan ske på olika sätt blir definitionen av utrymmena väsentlig då den påverkar kravbilden för den fortsatta analysen.

Det är därför nödvändigt att begrepp i brandtekniska analyser definieras i dokumentationen för att dels förklara skyddsprinciperna men också för att undvika att missförstånd sker. I vissa fall är begrepp tydligt definierat inom tillämpningsområdet t ex brandcell som utgör ett utrymme som är omslutet av konstruktioner med brandteknisk klass och som är likvärdigt med begreppet "Fire compartment" enligt IAEA (2004).

Verksamheter som exempelvis ställverksrum, batterirum, kontrollrum och reaktorinneslutning ska ofta placeras i egna brandceller i enlighet med gällande föreskrifter. I vissa fall ska anläggningens säkerhetsfunktioner dessutom, inom brandcellen, skyddas ytterligare med byggnadstekniska komponenter, fysisk separation eller aktiva skyddssystem. För att hantera dessa ytterligare skydd inom en brandcell förekommer i amerikanska föreskrifter begrepp som "Fire area" och "Fire cell". Begreppen "Fire area" och "Fire cell" används alltså för att beskriva skyddsstrategier för att med en ytterligare brandteknisk separation hantera oberoenden mellan anläggningens säkerhetsfunktioner. Begreppet "Fire cell" ska inte förväxlas med svenskans brandcell.

En "Fire cell" eller "Fire area" kan utgöras av ett delvis brandtekniskt avskilt utrymme inom en brandcell men skyddet som åsyftas även utgöras av ett aktivt skyddssystem t ex en vattensprinkleranläggning dvs det behöver inte utgöras av brandavskiljande väggkonstruktion. För att underlätta förståelsen i brandtekniska analyser bör även de amerikanska uttrycken anges i text med korrekt referens för att syftet ska vara tydligt. Risker för förväxling är även stor mellan begreppet "Fire area" enligt NRC (2009) och beskrivningen av brandens fysiska utbredning i en lokal eller över ett bränsle.

Boverket använder följande definition för brandcell:

### **Brandcell**

Med brandcell avses en avskild del av en byggnad inom vilken en brand under hela eller delar av ett brandförlopp kan utvecklas utan att sprida sig till andra delar av byggnaden eller andra byggnader. Brandcellen ska vara avskild från byggnaden i övrigt med omslutande väggar och bjälklag eller motsvarande, så att utrymning av byggnaden tryggas och så att personer i intilliggande brandceller eller byggnader skyddas under hela eller delar av ett brandförlopp.

Inom en brandcell kan det vidare finnas utrymmen avskilda med väggar. Dessa väggar kan förvisso vara utformade med brandteknisk klass men om inte exempelvis en genomgående ventilationskanal skyddas så utgör väggen inte formellt en brandcellsgräns. Hela konstruktionen

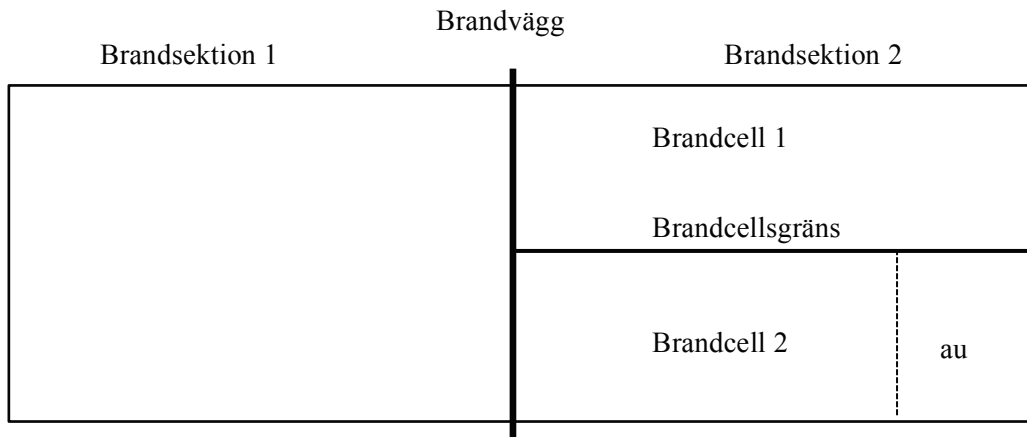
måste uppfylla kraven på avskiljande och i vissa fall även bärande förmåga. Det finns därför inga starka skäl att införa en underkategori till brandcell. Möjligen kan det finnas skäl att använda begrepp som *ett delvis brandtekniskt avskilt utrymme inom en brandcell* om det behövs för att förklara skyddsstrategier för att skapa oberoenden mellan anläggningens säkerhetssystem. Ett vidare begrepp som också kan användas kan vara *brandteknisk separation* vilken kan uppnås genom olika metoder. Tabell 1 kan tjäna som vägledning för översättning av begreppen.

I samband med byggnation i Sverige förekommer även begreppet brandsektion. En brandsektion är ofta en större yta än vad som är vanligt för en brandcell. En brandsektion kan bestå av en eller flera brandceller, figur 1. Motivet till att ha brandsektioner är att begränsa omfattande brandspridning inom en byggnad eller till en annan byggnad. En brandsektion delas upp med brandväggar till skillnad från brandcellen som delas upp med brandcellsgränser. Skillnaden mellan dessa är att en brandvägg även ska kunna motstå en mekanisk påverkan dvs att något faller på väggen och den ska ändå stå kvar. Brandväggen ska även vara utförd så att byggnaden på ena sidan kan rasa utan att brandväggen nämnvärt påverkas. Det finns således ett högre integritetsskydd för en brandvägg jämfört med en vägg som används för att skilja två brandceller.

Tabell 1. Definition av några brandtekniska begrepp.

| IAEA             | NRC                          | SSM                    | Kommentar                                                                                                                                                                   |
|------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IAEA, 2004       | NRC, 2009                    | SSMFS 2008:17          |                                                                                                                                                                             |
| Fire compartment | Fire compartment             | Brandcell              | Byggnadsdelar avgränsar brandcellen. Skyddsnivån ska normalt vara fullständigt brandförlopp dock lägst minst en timma enligt standardiserad brand (EI60), (enl IAEA, 2004)  |
| Fire cell        | Fire area                    | svenskt begrepp saknas | Konstruktionsprincip innebärande att redundanta säkerhetssystem separeras. Utrymmet kan vara utfört som egen brandcell men separationen kan ske med annat än byggnadsdelar. |
|                  | Fire zone (del av Fire area) | svenskt begrepp saknas | Fysisk separation av komponenter som kan ske med väggar och andra konstruktionsdelar. Utrymmet motsvarar normalt inte utrymme i egen brandcell.                             |
|                  |                              | Brandbyggnad           | Begreppet förekommer inte i någon av referenserna.                                                                                                                          |
|                  |                              | Delbrandcell           | Begreppet förekommer inte i någon av referenserna.                                                                                                                          |





**Figur 1. Uppdelning av byggnad (planritning) i brandsektion, brandcell och annat utrymme inom brandcell (au) som ej är brandtekniskt avskilt (t ex en sk "Fire cell" enligt IAEA (2004)).**

## 1.7 Läsanvisning

Denna kvalitetsmanual består av fem kapitel, varav kapitel 1 ger en inledande beskrivning av brandanalyser och kvalitetsbegreppet. I kapitel 2 redovisas ett förslag till en arbetsgång för brandtekniska analyser bestående av sju steg, från uppstart till avslut. I kapitlet finns en omfattande beskrivning av brandscenarier och hur dessa ska identifieras och väljas ut. Kapitlet ger också en introduktion till tre typer av brandmodeller – handberäkning, tvåzonsmodeller och fältmodeller.

Det tredje kapitlet ger vägledning kring modellering av brandscenarier. Olika typer av brandscenarier karakteriseras på ett sätt som underlättar valet av modell. Beräkningsstrategier redovisas och olika brandmodellers lämplighet diskuteras. Kapitlet omfattar också en vägledning hur brandscenarier ska beskrivas med syfte att underlätta brandmodelleringen. Det finns även ett särskilt avsnitt tillägnat ventilationskontrollerade bränder. Det fjärde kapitlet omfattar indata till brandtekniska analyser och ger exempel på skadekriterier och brandförlopp. Materialegenskaper relaterade till värmeledning och förbränning redovisas.

I det femte kapitlet görs en fördjupning av kvalitetsaspekter relaterade till användning av fältmodellen FDS (Fire Dynamics Simulator), McGrattan och Forney (2010). Kapitlet beskriver modellens användningsområde och lämplighet på ett tydligt sätt, samtidigt. Kapitlet beskriver den validering som modellen genomgått och ger vägledning för kvalitetssäkring av brandsimuleringarna.



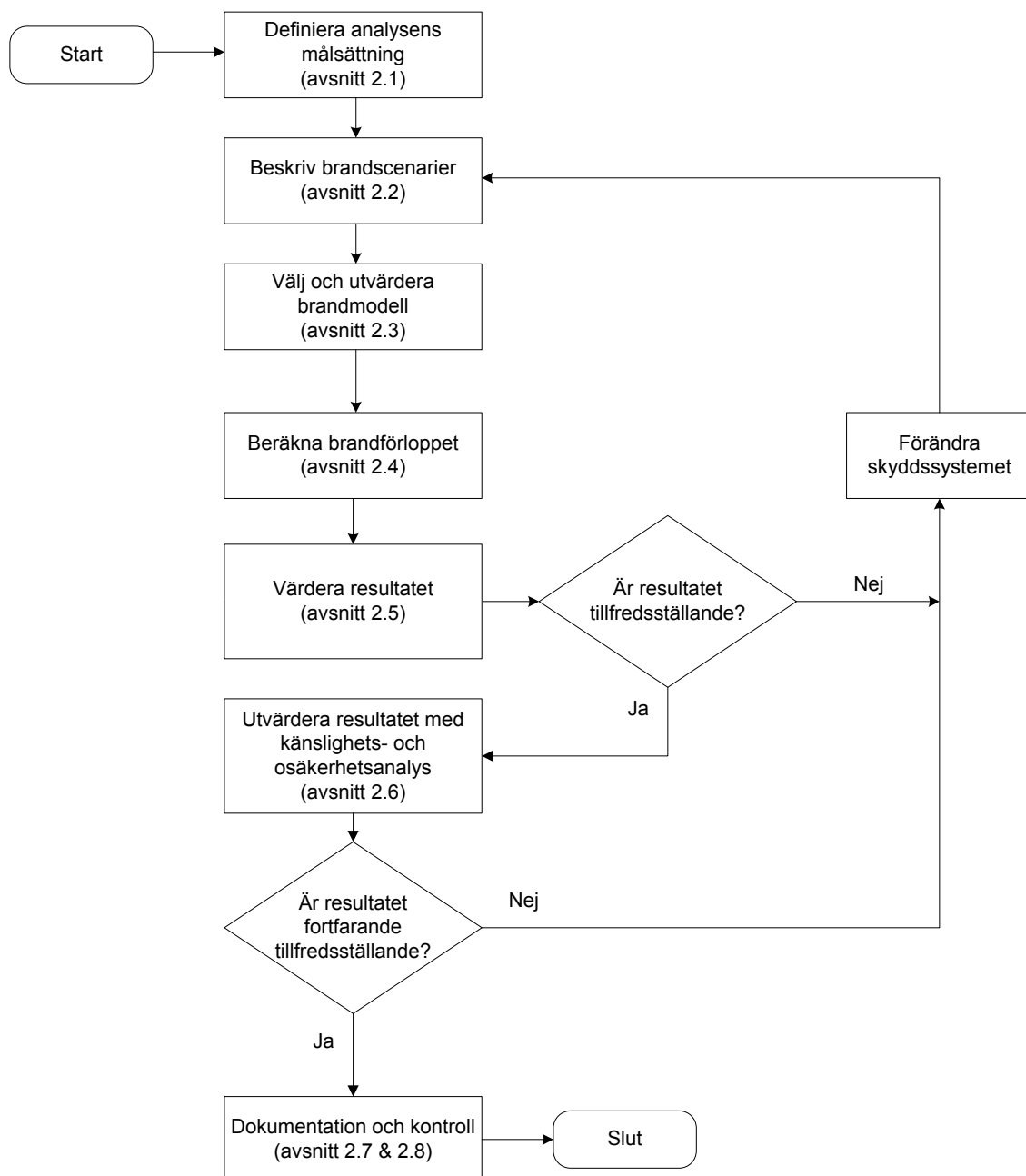
## 2 Arbetsgång för brandtekniska analyser

Detta kapitel ger en allmän beskrivning av de steg som utgör ett förslag till arbetsgång vid brandtekniska analyser i kärntekniska anläggningar. Utgångspunkten är att analysen genomförs som en sk scenarioanalys där anläggningen ska visas kunna hantera ett antal i analysen definierade allvarliga brandscenarier. Avsikten är att osäkerheter i förutsättningar och den matematiska modellen hanteras genom ett konservativt val av analysförutsättningar. Arbetsgången kan även användas för en mer riskbaserad analys men den får då modifieras eftersom huvudstrategin i det fallet är att genomföra analysen med den metod som nedan beskrivs som steg 6.

Den rekommenderade arbetsgången består av åtta steg; 1) definiera analysens målsättning, 2) beskriv brandscenarier, 3) välj lämplig brandmodell, 4) beräkna brandförloppet, 5) värdera resultatet, 6) utvärdera resultatet genom en känslighets- och osäkerhetsanalys för att kunna avgöra om resultatet är tillfredsställande, 7) dokumentera analysen och 8) utför kontroll. Om resultatet inte är tillfredsställande, vare sig vid den första värderingen i steg 5 eller efter känslighets- och osäkerhetsanalysen i steg 7, är det nödvändigt att förändra skyddssystemet på något sätt och göra om analysen.

Arbetsgången visas i figur 2 och har stora likheter med den procedur som beskrivs i utkastet till NUREG-1934 (NUREG-1934, 2010). De ingående komponenterna överensstämmer men flödet mellan komponenterna är anpassat så att det stämmer mer med intentionerna med funktionsbaserad verifiering.

Generellt gäller att om brand utgör en inledande händelse så räcker med att analysen förutsätter en (1) brand dvs analysen behöver inte förutsätta att fler bränder inträffar samtidigt. Brand kan också uppstå efter en annan inledande händelse som inte är brand, SSMFS 2008:17, (2009).



**Figur 2** Arbetsgång vid brandtekniska analyser.

## 2.1 Steg 1: Definiera analysens målsättning

Det första steget i en brandteknisk analys är att definiera och beskriva analysens målsättning och vilka problem som motiverar analysen. En tydligt beskriven målsättning är en nödvändigt för val av brandscenarier och lämpliga brandmodeller. Målsättningen ska beskrivas i kvantitativa termer och tydligt ange vad som är önskvärt att påvisa med analysen. Det bör tidigt konstateras hur den önskade åtgärden som ska analyseras påverkar anläggningens skyddssystem t ex i vilken grad sk fel med gemensam orsak kan uppstå.

Många brandtekniska analyser jämför beräkningar av brandförloppet med skadekriterier för att fatta beslut om situationen är tillfredsställande. Skadekriterier uttrycks vanligen som gränsvärden avseende temperatur eller värmestrålning. Därför är det viktigt att analysens målsättning beskrivs på ett sådant sätt att det är möjligt jämföra analysens resultat med

tillämpbara skadekriterier. Allt i syfte att kunna fatta beslut om resultatet är att beakta som tillfredsställande.

Följande exempel förtydligar tankegången: ”Undersök om några kablar kan upprätthålla sin funktion vid brand”. Skadekriteriet för kablar är en ytemperatur på 330° C, vilket ger en lämplig målsättning för analysen till att ”avgöra om ytemperaturen på kablarna överstiger 330° C när de utsätts för ett visst förutbestämt brandscenario”. Denna målsättning är beskriven i termer som direkt möjliggör en jämförelse med resultatet av en analys av brandförloppet.

## 2.2 Steg 2: Beskriv brandscenarier

Nästa steg efter att målsättningen med analysen har definierats är att genom en riskidentifiering omsätta målformuleringen till en analyserbar modell. Detta innebär att det brandtekniska problemet ska formuleras i termer av minst ett brandscenario, vanligen många fler, som fångar upp det som analysen ska belysa. Ett brandscenario är en kvalitativ beskrivning av brandens utveckling med hänsyn till olika händelser som antändning, tillväxt, öppningar, skyddssystem, etc. Ett brandscenario har en tydlig tidsaxel och karakteriserar branden samt skiljer den från andra möjliga bränder. I ett följande steg ska brandscenariot kvantifieras.

Den metodik för att identifiera och välja brandscenarier som redovisas i kvalitetsmanualen bygger på ett tillvägagångssätt som beskrivs i ISO/DTS 16733 ”Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires”. Val av brandscenarier bör ske i en systematisk process, som sammanfattas i nedanstående punkter:

- ♦ Undersök först vilken typ av verksamhet som skall bedrivas i byggnaden och vad i byggnaden samt verksamheten som kan ge upphov till brand (avsnitt 2.2.1).
- ♦ Identifiera sedan alla brandscenarier för att skapa scenariokategorier och välj ut dimensionerande scenarier som representerar respektive kategori (avsnitt 2.2.2).
- ♦ För vart och ett av de dimensionerande brandscenierna väljs sedan omsorgsfullt relevanta representativa parametrar (avsnitt 2.2.3).

### 2.2.1 Identifiering av möjliga brandscenarier

Det är nödvändigt att identifiera alla de egenskaper och förutsättningar som är karakteristiska för branden och därmed bygger upp själva brandscenariot. Än så länge handlar det om kvalitativa beskrivningar med tyngdpunkt i logiska och tidsmässiga kopplingar mellan olika händelser, samt en insamling av indata som behövs för själva brandanalysen. Genom att besvara nedanstående frågeställningar är det möjligt att specificera ett brandscenario med utgångspunkt i dess händelser och de brandförhållanden som tillhör respektive händelse.

#### ***Var startar branden?***

Var branden startar är starkt kopplat till varför det börjar brinna. Statistik på dessa områden kan vara ett bra hjälpmedel för valet av denna parameter. Att identifiera var en byggnad eller del av byggnad är som mest sårbar för uppkomst av brand innebär en mängd ingenjörsmässiga bedömningar.

Konsekvensen av brand är också beroende av startutrymmet. En brand i en vanligt förekommande typ av utrymme behöver inte medföra brandspridning, medan en brand i ett sällan förekommande utrymme mer frekvent kan ge upphov till skador på personer och egendom. Valet av brandscenarier påverkas även av vilka komponenter det är som ska skyddas.

*Besvara:*

- ♦ Var startar branden?
- ♦ Hur ser bränslet och tändkällan ut?
- ♦ Finns det annat brännbart material i närheten dit branden kan spridas?

Det är möjligt att det finns flera möjliga startföremål och tändkällor, vilka alla behöver beaktas. I detta steg bör man beakta särskilda brandrisker i byggnaden som kan medföra extraordinärt stora konsekvenser. Det kan handla om användning av material med särskild risk för brandfara, vilka kan vara ovanligt lättantändliga, producera stora mängder toxiska brandgaser eller ha mycket snabba brandförlopp. Förekomst av verksamheter där öppen låga hanteras nära brännbart material bör också beaktas.

### ***Typ av brand***

Typ av brand är starkt kopplat till de parametrarna ”startutrymme” och ”brandsak” som analyseras ovan. Antändningskällan avgör hur brandens initiala skede karakteriseras, medan möjligheten för brandspridning samt brandrummets geometri, ventilation och öppningar avgör tillväxthastighet och maximal effektutveckling. Glödbrand och flamförbränning är olika faser av, inte olika typer av bränder. Det går inte automatiskt att anta att det är glödbranden som dominerar skadorna orsakade av branden.

*Besvara:*

1. Förekommer glödbrand? Om ”ja”, bedöm varaktigheten av denna fas och efterföljande faser.
2. Förekommer någon form av flamförbränning, tillfällig eller kontinuerlig, där det startföremålet är det enda föremålet som brinner?
3. Sprider sig branden till angränsande material, eller om aktuellt, förekommer ansenlig yttflamspridning (t.ex. längs en vägg eller en kabelstege)?
4. Kan branden passera övertändning och bli fullt utvecklad, antingen i starttrummet eller i ett annat slutet utrymme?
5. Under hur lång tid pågår branden?
6. Hur påverkas anläggningens skyddssystem av konsekvensen av en brand?
7. Sprider sig branden till ett annat rum, brandcell eller utrymme?
8. Sprider sig branden till ett annat våningsplan?
9. Sprider sig branden till en annan byggnad?
10. Undantaget effekterna av själva branden, kommer de inledande förutsättningarna förändras under brandförloppet (t.ex. vindriktning och vindhastighet)?

### ***System och egenskaper som påverkar branden***

Aktiva system har ofta en stor inverkan på brand och utrymningsscenarier som helhet, men det är viktigt att särskilt beakta systemens tillförlitlighet och effektivitet. Exempel på aktiva system är:

- ♦ Den normala ventilationen (fläktar, spjäll mm) som är i drift vid brandstarten. Ventilationen har normalt stor inverkan på brandens konsekvens då naturliga öppningar vanligen saknas i kärntekniska anläggningar.
- ♦ Aktiva släcksystem som till exempel sprinkler installeras för att släcka eller begränsa brandspridning och brandtillväxt men har också stor inverkan på brandgasspridningen i rummet.
- ♦ Brandgasventilation (fläktar och luckor) kan vara helt avgörande för personsäkerheten i en byggnad om detta är korrekt dimensionerat.
- ♦ Automatiskt brand- och utrymningslarm har mycket stor inverkan på utrymningsscenariot

Passiva system har stor inverkan på brandförloppet så som brand och brandgasspridning, tillväxt samt maximal effektutveckling. Exempel på passiva system och faktorer är:

- ♦ Lokalernas storlek påverkar brandgasspridningen i rummet och brandens maximala effekt i form av begränsningar i mängd brännbart som kan inrymmas och är en faktor i de beräknings och simuleringsmodeller som används.
- ♦ Öppningar (dörrar och fönster) avgör brandrummets rökfyllnad, brandgasspridning till intilliggande utrymmen samt är helt avgörande för storleken på den ventilationskontrollerade branden.
- ♦ Material i golv, väggar och tak påverkar värmetransporten genom elementen vilket i sin tur påverkar värme- och röktransporten i och mellan rummen. Ytmaterial har inverkan på brandspridning i rummet.

*Besvara:*

- ♦ Vilken status och förmåga har passiva och aktiva brandskyddssystem? Genomgången avser att belysa hur det systematiska brandskyddsarbetet bedrivs med avseende på kontroll och underhåll. Har det förekommit fel som gör att ett system eller utrustning inte kan upprätthålla sin funktion?

Fel i passiva skyddssystem som kan finnas innan antändning ska beaktas. Det kan handla om dörrar i brandcellsgränser som står uppställda, ej tätade genomföringar. Det är också nödvändigt att bedöma om skyddsförmågan hos de passiva systemen äventyras under själva brandförloppet, t.ex. då brandens varaktighet är längre än det brandmotstånd som erbjuds.

Samma sak gäller aktiva system där otillgängliga system innan antändning kan relateras till avstängt brandlarm, eller avstängd vattentillförsel till sprinklersystem, samt andra underhållsarbeten som gör aktiva system otillgängliga.

Under brandförloppet är det nödvändigt att beakta huruvida t.ex. sprinklersystemet har tillräcklig förmåga att hantera brandens intensitet och omfattning. Det är också nödvändigt att beakta händelser som kan orsaka samtidiga fel på flera skyddssystem. Flera varianter på det sk grundscenariot kan därför behöva undersökas.

### ***Människors reaktioner och påverkan på branden***

Det är av största vikt att uppskatta hur de som skall utrymma byggnaden kan tänkas reagera i händelse av brand. Personernas fysiska, mentala och sociala egenskaper påverkar reaktionerna vid brand och kan göra stora skillnader i den tid som krävs för utrymning och hur de genomför en eventuell släckinsats. Typiska egenskaper som är av betydelse är medvetandegrad och lokalkännedom. Medvetandegraden hos personerna påverkar hur snabbt de uppfattar att det brinner och varierar exempelvis mellan sovande och vakna. Lokalkännedom och kunskap hos personerna i hur de bör agera i händelse av brand kan inte bara innebära att de snabbare sätter sig själv i säkerhet, men även deras möjlighet att göra en släckinsats. En tidig släckinsats är av stor betydelse för att undvika att brandtillbudet utvecklas till en fullskalig brand.

Något som också är väsentligt för kärntekniska anläggningar är förhållandet mellan personal som kan göra en direkt insats och personalen i kontrollrum som ytterst ansvarar för driften. Det kan finnas administrativa rutiner som kan påverka graden av frihet vid en insats.

*Besvara:*

- ♦ Vilka andra händelser (t.ex. mänskligt agerande som utrymning eller brandbekämpning) påverkar antingen brandens utveckling eller människors exponering av branden? Om mänskligt agerande förekommer vilken kunskap, färdighet, attityd, uppfattning, känslighet, placering har personerna? Vilka administrativa rutiner påverkar möjligheten att begränsa en brand? Måste vital elektrisk utrustning stängas av innan släckning kan ske?

## **2.2.2 Brandscenariokategorier**

Genomgången i avsnitt 2.2.1 kan resultera i ett stort och svårhanterligt antal brandscenarier. Därför kan det vara praktiskt att gruppera scenarier med liknande egenskaper i olika kategorier.

Skillnaden mellan ett enskilt brandscenario och den grupp som scenariot tillhör kan beskrivas med följande exempel:

Ett brandscenario kan beskrivas väldigt detaljerat där med en tändkälla utgörandes av en tändsticka som antänder stoppningen på en fåtölj placerad i en hörna i ett rum. En grupp av brandscenarier som inkluderar detta scenario kan specificeras som antändning av lös inredning med liten flamma.

Det är också möjligt att skapa scenariogrupper, vilka utgår från brandens placering och om de exempelvis blockerar en utrymningsväg eller uppkommer på en särskilt känslig plats. Andra aspekter som kan behöva beaktas är variation för ett bränsles placering i rummet och över tiden.

### 2.2.3 Representativa brandscenarier

Efter att brandsceniarierna har grupperats i olika kategorier är det nödvändigt att välja ut ett representativt brandscenario från resp. kategori vilket ska användas för att undersöka om den i avsnitt 2.1 angivna målsättningen med brandanalysen uppfylls. Valet av representativt scenario är således i hög grad beroende av analysens målsättning. Handlar det om att bedöma funktionen hos en avskiljande konstruktion ska bränder som äventyra denna förmåga väljas. Om det i stället handlar om en mer övergripande säkerhetsanalys är scenarier som påverkar säkerhetskritiska system mer intressant. De representativa sceniarierna för dessa två fall behöver inte vara desamma.

Det representativa scenariot ska generera utdata som är viktiga för målsättningen med analysen. Om analysen syftar till att avgöra om en viss uppsättning kablar behåller sin funktion vid brand är det viktigt att analysera brandscenarier som täcker in brandförhållanden vilka kan bidra till att skada de berörda kablarna. Både mindre bränder som uppkommer nära kablarna och större bränder längre bort är av intresse. Ibland går det inte att välja vilket scenario som är värst, utan att först genomföra själva analysen.

Brandscenariot ska vara påfrestande för det system som studeras. Om målsättningen med analysen är att studera infallande värmestrålning mot en kritisk utrustning så är exempelvis en brand, placerad långt från objektet troligen inte ett representativt scenario.

Att identifiera tändkällor och placering av brännbart material är förhållandevis enkelt, men det kräver väl avvägda bedömningar för att ge branden dess exakta placering i rummet. Placeringen avgörs av var kritiska objekt är placerade i förhållande till det brännbara materialet och tändkällorna. Fyra olika situationer kan identifieras:

1. *Kritisk utrustning med direkt flampåverkan.* Beräkningar av flamhöjden ska göras för att kontrollera om objektet blir utsatt för direkt flampåverkan. Om flammor når objektet kan det vara nödvändigt att flytta ner branden då en placering i toppen av det brännbara materialet trots allt är den mest konservativa placeringen. Om direkt flampåverkan är oundviklig ska analysen naturligtvis återspegla detta.
2. *Kritisk utrustning i brandplymen eller takstrålen.* Branden bör placeras i toppen av brinnande föremålet, t.ex. ett elskåp. Detta ger högre flamhöjd och högre temperatur i plymen och takstrålen. Dock måste användaren avgöra om placeringen är ett konservativt antagande i relation till analysens målsättning. Handlar analysen om att bestämma tid för aktivering av säkerhetssystem är det inte säkert att så är fallet. En annan placering bör då övervägas.
3. *Kritisk utrustning i det övre brandgaslagret.* Brandens placering i höjddled kan påverka hur långt brandgaslagret sträcker sig ner mot golvet och därmed också temperaturen i det.
4. *Kritisk utrustning som påverkas av värmestrålning.* Branden ska placeras på så sätt att det finns en klar siktlinje mellan branden och den kritiska utrustningen. Naturligtvis kan man ta hänsyn till förekomst av eventuella flamskärmar. En horisontell linje mellan branden och objektet är den mest konservativa placeringen.

Det representativa brandscenariot ska beskrivas kvantitativt, vilket gör det nödvändigt att bedöma följande:

- ♦ Parametrar som ges av det dimensionerande brandscenariot exempelvis rummets storlek, brandens placering, typ av brännbart material, tändkälla, öppningsförhållanden, etc.
- ♦ Parametrar som är nödvändiga för att kunna bedöma brandförloppet, dvs. effektutveckling och produktion av brandgaser.
- ♦ Händelser som kan komma att ändra någon av parametrarna som beskrivits ovan, t.ex. ventilationsförhållanden, förekomst och funktion av aktiva samt passiva skyddssystem, mänskligt agerande etc.

De dimensionerande bränderna karakteriseras vanligen genom följande, tidsberoende, variabler (givet att de är nödvändiga för att verifiera brandsäkerheten):

- ♦ Effektutveckling och tillväxthastighet (se avsnitt 4.2).
- ♦ Produktion av brandgaser och sot (se avsnitt 4.3.2).
- ♦ Brandens storlek (se avsnitt 4.2).

Exempel på faktorer som behöver specificeras för att kunna beskriva ovanstående variabler är:

- ♦ Tändkälla.
- ♦ Typ av brännbart material.
- ♦ Bränslepaketens placering.
- ♦ Rummets geometri.
- ♦ Effektutveckling.
- ♦ Ventilationsförhållanden.
- ♦ Värmestrålning.
- ♦ Exponerad yta.

Vanligtvis väljs värden på parametrar så att de är konservativa och ofta bedöms till att vara s.k. värsta troliga. Det kan finnas skäl att jobba med mer troliga (medianlika) värden, men då behöver analysen kompletteras med en mer avancerad känslighetsanalys där osäkerheten i variabeln undersöks i detalj. Mer information om tillvägagångssätt vid sådana analyser finns i avsnitt 2.6.

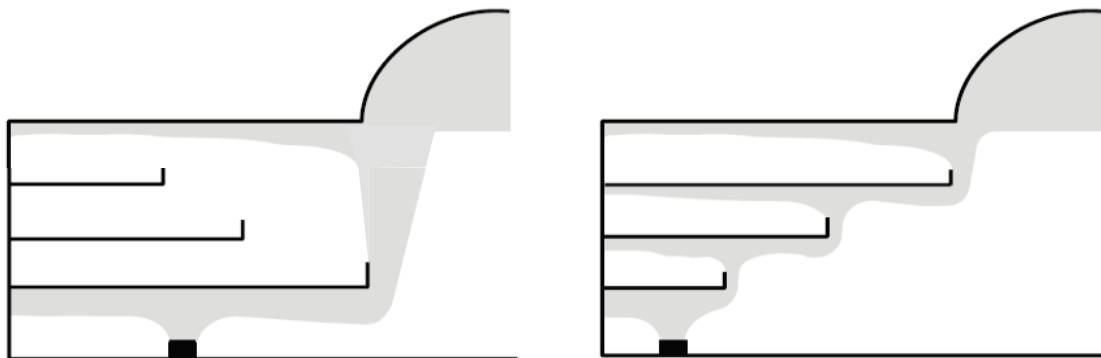
## 2.3 Steg 3: Välj brandmodell

Det finns flertalet brandmodeller tillgängliga för att beräkna brandförloppet i en byggnad. Dessa sträcker sig från enkla handberäkningsuttryck baserade på empiriska korrelationer till avancerade flödesdynamiska modeller (CFD) som kräver dagar för att bygga upp modellen och genomföra själva beräkningen. Modeller är matematiska verktyg som används för att representera verkliga situationer och alla modeller har sina begränsningar. Det är viktigt att projektören känner till begränsningarna och använder modellen korrekt samt beaktar resultaten med ett viss mått av konservatism som illustrerar precisionen i modellen och gjorda antaganden. Användaren måste förstå vilka för- och nackdelar som finns med valet av en viss modell för den aktuella analysen.

Problemets och byggnadens komplexitet är ofta styrande för vilken modell som används. Modellen måste på ett korrekt sätt representera förhållandena i byggnaden. Det är inte säkert att en mer tidskrävande modell ger ett mer tillförlitligt resultat, utan det är snarare så att modellvalet styrs av brandscenariot och byggnadens utformning. Ett exempel visas i figur 3 där det vänstra scenariot med enkla förhållanden för spridning av brandgaser kan beräknas med



enkla modeller, medan det högra scenariot kräver avancerade verktyg pga. förekomst av flera spillplymer.



**Figur 3 Byggnadens komplexitet styr valet av modell.**

Alla modeller har begränsade användningsområden vilka kan bero på modellens uppbyggnad (t.ex. förekomsten av en tvåzonsskiktning i ett rum), hur modellen är validerad eller vilken kvalitet som finns på tillgänglig indata.

Vissa modeller ställer också stora krav på användarens förmåga att ange korrekta indata och säkerställa att modellen uppträder på ett korrekt sätt. Vissa anvisningar finns kan finnas i användarhandledningar eller i publicerade artiklar.

De flesta modeller som används för att uppskatta effekter av en brand utgår från en förutbestämd effektutveckling (i kW) och hur denna varierar med tiden. Om en otillräcklig dimensionerande brand är vald kommer inte heller modellen att kunna leverera relevanta resultat.

Flera modeller har validerats för en begränsad rumsstorlek, vilken inte bör överskridas. Det är viktigt att ha kännedom om en modell för en rumsbrand kan skalas upp för att användas exempelvis i ett höglager. Även förhållandet mellan rummets höjd, längd och bredd kan ha en avgörande begränsning på modellens förmåga och flera modeller har problem med långa, smala korridorer eller i rum med stora takhöjder. Liknande problem kan förekomma i rum med sluttande tak.

I samband med kontrollen av valda beräkningsprogram och modeller ska projektören visa att den valda modellen:

1. har tillräcklig precision,
2. är lämplig att använda för det aktuella scenariot,
3. har validerats och verifierats i tillräcklig omfattning, och
4. är ”allmänt” accepterad för det aktuella dimensioneringsproblemet.

Vissa modeller kräver mer indata än andra och ingenjörens förmåga att använda en viss modell kan bero på tillgången och kvaliteten på indata som effektutveckling, materialegenskaper, produktion av brandgaser och personers förflyttningshastighet. Ofta görs antaganden då indata saknas. Ibland extrapoleras data från kända källor eller så används konservativa ingenjörsmässiga bedömningar. I dokumentationen måste det framgå vilka antaganden som gjorts samt motiv till att dessa är lämpliga i det aktuella fallet.

Det första steget för att välja rätt modell är att avgöra om analysproblemet kan hanteras med handberäkningsmodeller, zonmodeller eller fältmodeller. Handberäkningsmodellerna är absolut enklast i sin uppbyggnad och kräver minst indata och resurser när de ska användas. Därefter ökar arbetsbördan och behovet av korrekta indata när zonmodeller och fältmodeller ska användas. Ju mer komplicerad modell, desto större krav ställs på användaren.



Oftast kan det vara fördelaktigt att kombinera de olika modelltyperna inom ramen för analysuppgiften. Exempelvis kan handberäkning användas för att bestämma infallande strålning mot ett objekt för att bestämma erforderligt skyddsavstånd. En zonmodell kan ge brandgaslagrets höjd och temperatur när värmepåverkan på ett kabelstråk ska studeras. Fältmodeller tar vid där handberäkningar och zonmodeller inte ger tillräckligt precisa resultat, vilket oftast handlar om komplicerade geometrier där rumskonfigurationer eller inredningen gör de enklare modellerna olämpliga. Fältmodeller kan också användas för att utvärdera resultatet från de enklare modellerna. En kortfattad sammanfattning av de olika modellerna redovisas nedan, vilka sedan beskrivs mer utförligt i avsnitt 2.3.1-2.3.3. Det bör noteras att det finns flera olika modeller inom respektive modelltyp och att utvecklingen inom detta område sker snabbt. I redogörelsen nedan beskrivs några av de vanligare modellerna, i huvudsak CFAST och FDS.

- ♦ Handberäkningsmodeller
  - Empiriska samband för att bestämma t.ex. flamhöjd, brandgaslagrets temperatur och höjd
  - Snabba och baserade på erfarenhet
  - Stora osäkerheter och begränsat användningsområde
- ♦ Zonmodeller
  - Enkla geometrier och okomplicerade problem
  - Snabba, accepterade och möjliga att använda för flera rum
  - Ingen lokal information och begränsningar relaterade till rummets geometri.
- ♦ Fältmodeller
  - Komplicerade geometrier och komplicerade problem
  - Möjligt att studera lokala värden i geometriskt komplicerade lokaler med den lägsta graden av empirism.
  - Svårt att lära sig och långsamma.

### 2.3.1 Handberäkning

Handberäkningsmodeller, baserade på empiriska korrelationer, kan lösas för hand eller i enkla kalkylark, med en relativt liten arbetsinsats. När handberäkningsmodeller används för att kvantifiera brandförloppet krävs att följande beaktas:

- ♦ Ekvationerna anger ett s.k. ”steady state” då förhållandena antas att antingen vara konstanta eller giltiga endast för en specifik tidpunkt.
- ♦ De flesta ekvationer är semi-empiriska, vilket innebär att de har tagits fram med utgångspunkt i fysikaliska försök. Det är viktigt att känna till dessa försök för att kunna avgöra om modellen är tillämpbar.

Handberäkningsmodeller kan delas in i tre grupper; 1) modeller som hanterar förbränning, 2) modeller som uppskattar förhållanden i brandrummet och 3) modeller som hanterar värmetransport. Ekvationer relaterade till själva förbränningen uppskattar brandens intensitet som en funktion av bränslets egenskaper. Exempel på förhållanden i brandrummet som den andra gruppen av ekvationer kan beskriva är temperatur i plymen, takstrålen och rummet. Ekvationer för värmetransport hanterar värmepåverkan hos ett objekt genom att studera strålning, konvektion värmeledning. Nedanstående lista visar exempel på variabler som kan kvantifieras med hjälp av handberäkning.

- ♦ Effektutveckling som en funktion av tiden.
- ♦ Värmestrålning från flammor mot skyddsobjekt.

- ♦ Flamhöjd, plymtemperatur, plymflöde och plymdiameter.
- ♦ Takstrålens temperatur och hastighet.
- ♦ Temperatur i brandrummet vid en viss tidpunkt.
- ♦ Effektutveckling som krävs för att nå övertändning.
- ♦ Aktiveringstid för rök- och värmedetektorer, samt sprinklerhuvuden.
- ♦ Brandgaslagrets höjd.
- ♦ Effektutveckling vid kabelbränder.
- ♦ Siktbarhet i rummet.
- ♦ Tid till kritisk temperatur för ett föremål som utsätts för strålningspåverkan.
- ♦ Temperaturpåverkan i bärande konstruktioner.

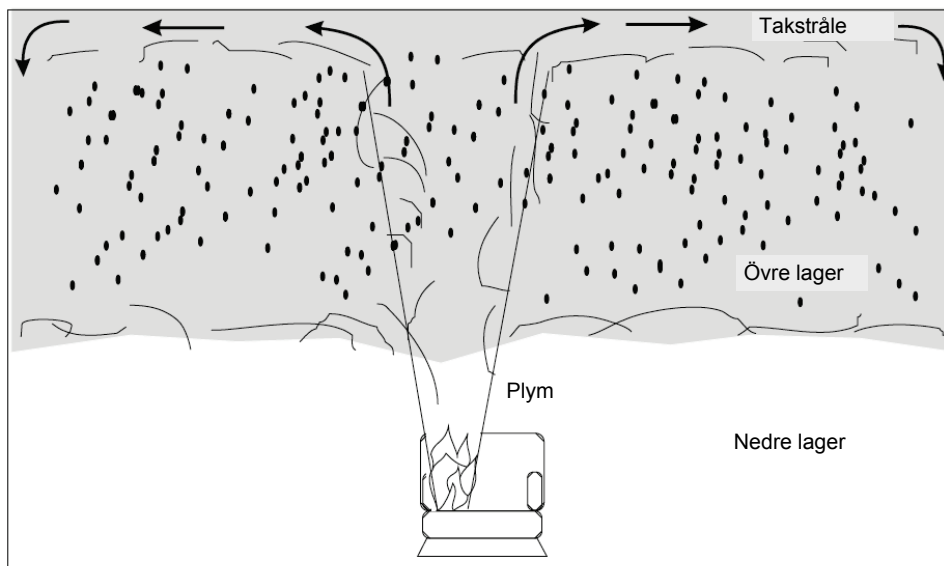
I ”Enclosure Fire Dynamics” av Karlsson & Quintiere (2000) finns de flesta handberäkningsekvationer för kvantifiering av brandförloppet samlade. Boken anger också tydliga användningsområden, samt modellernas begränsningar.

### 2.3.2 Tvåzonsmodeller (CFAST)

Zonmodeller är datorprogram bestående av algoritmer som beräknar massa- och energibalansen vid en brand. Zonmodellerna bygger på antagandet att ett rum kan delas in i två åtskilda zoner, inom vilka förhållandena är likformiga t ex temperaturen i den övre zonen varierar inte för olika platser i rummet. Oftast delas ett rum in i två zoner i samband med brandförloppsberäkningar. Överst i rummet finns det varma brandgaslaget och nederst finns ett kallt lager med friskluft, figur 4. Grundläggande för modellen är att varje zon (eller lager) har homogena egenskaper, dvs. en och samma temperatur, densitet, koncentration av brandgaser etc.

Det övre brandgaslaget utgörs av den volym brandgaser som branden genererar, vilka ansamlas nedanför rummets tak. Dess temperatur och djup påverkas av hur mycket massa och energi som tillförs eller försvinner för varje tidssteg i simuleringen. Det nedre kalla lagret utgörs av kall friskluft mellan golvet och det övre brandgaslaget. Värmestrålning från flamman och det övre brandgaslaget kan ge en viss temperaturökning även i det nedre lagret.

Utöver det övre och nedre lagret så utgör beskrivningen av plymen och takstrålen, omslutande konstruktioner samt bränslepaketen, väsentliga delar av en zonmodell. Typiskt för 2-zonsmodeller är homogena lager (väl omblandat inom lagret) och att det sker någon ”mixing” mellan lagerna. Vidare modelleras alla rum som rätblock och det är inte möjligt att studera lokala fenomen.



**Figur 4 Zonmodellens uppbyggnad.**

CFAST (Consolidate model of Fire Growth and Smoke Transport), Peacock, Jones, Reneke och Forney (2008), är en av de vanligaste zonmodellerna vilken kan användas för att göra transienta beräkningar på brandgasspridning genom ett antal rum baserat på en användardefinierad brand.. CFAST stödjer flera rum och indata utgörs av rumsbeskrivning, effektutveckling etc. Möjlig utdata är bl.a. effektutveckling, flöden, temperaturer, värmetransport, brandgaslagrets höjd, koncentrationer. Det är också möjligt att studera aktivering av detektorer och sprinklerhuvuden.

CFAST är ursprungligen framtagen för beräkningar på brandgasspridning i bostäder och kvaliteten på resultaten är klart begränsad utanför detta användningsområde. Modellen består, precis som alla zonmodeller, av en samling ekvationer och korrelationer som försöker reproducera de fysiska fenomen som uppstår vid brand. En analys med CFAST görs således med en användardefinierad effektutveckling i en rumsuppbyggnad bestående av rätblock med material som också anges av branden. Därefter beräknar modellen effekter av branden och presenterar miljön i rummen i form av temperaturer, koncentrationer och optisk täthet i brandgaserna. De effekter av brand i byggnaden som zonmodellen studerar är relaterade till flöden och värmetransport. De stora begränsningarna ligger i beräkningarna av ventilationsflöden. I brandrummet är modellen tillräckligt bra, medan användningen i en brandcell med flera rum är begränsad. För rum på olika våningsplan ger modellen otillfredsställande resultat. Hitintills har zonmodellen inte verifierats för fler än 3-6 rum, i bostadsliknande förhållanden.

Zonmodellen löser kontinuitetsekvationer för massa, partiklar och energi för varje tidssteg. Olika submodeller ger källtermer till kontinuitetsekvationerna i form av förbränningshastighet, värmetransport, plymflöde, flöde i öppningar, etc.

Branden i zonmodell utgör förenklat bara en källa till massa och energi. Själva förbränningsprocessen modelleras inte och rummet ger ingen återkopplande inverkan på brandens intensitet. Branden representeras på ett enkelt sätt i form av massavbrinning tillsammans med förbränningsvärme och effektutveckling. Om syretillgången blir begränsad kan användaren välja att köra modellen som:

- ♦ "Unconstrained fire (type 1)"
  - Massavbrinningen antas vara lika stor som förbränningshastigheten oberoende av tillgången på syre.
  - Allt bränsle förbränns i plymen.

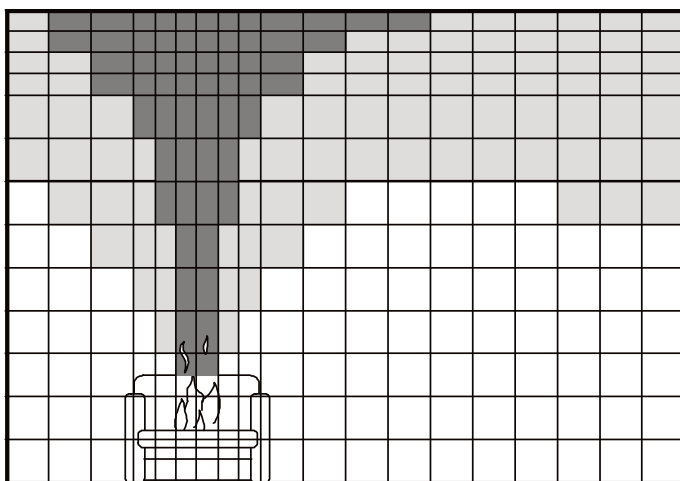
- Gaskoncentrationer kan inte beräknas, utan tillsätts plymen som en funktion av brandens effekt och syretillgången.
- ◆ “Constrained (limited) fire (type 2)”
  - Effekttutvecklingen begränsas av syretillgången, men massavbrinning sker oavsett.
  - Överskott av bränsle ger förbränning i övre lagret, i dörrplymen, i något av lagren tillhörande angränsande rum eller utomhus.

Fördelar med zonmodellen är att den är lätt att lära och använda samt att den genererar en stor mängd resultat på en kort tid. Den mängd utdata som genereras är också lätt att tyda. Dock är några begränsningar med zonmodellerna viktiga att känna till. Modellen kräver rum vilka kan liknas vid rätblock, vilket inte alltid är fallet. Modellerna beräknar inte själva branden, utan effekterna av en användardefinierad brand i form av transport av värme och brandgaser. Antagandet om ett homogent brandgaslager är inte helt rättvisade då temperaturen ofta varierar inom brandgaslagret precis som sikten och brandgasernas sammansättning. Zonmodellerna kan ej heller hantera en fullt utvecklad brand.

### 2.3.3 Fältmodeller (FDS)

För en del analysuppgifter räcker varken handberäkningar eller zonmodeller till. En användning av en fältmodell kan då bli ett alternativ. Fältmodeller (CFD-modeller) delar upp utrymmet i tusentals celler där temperaturen och andra variabler beräknas för varje cell. CFD-koden består av sofistikerade algoritmer, vilka används för att lösa en enklare form av Navier-Stokes ekvationer för flödesdynamiska beräkningar.

En CFD-modell kräver att rummet dels in i ett stort antal kontrollvolym, figur 5, och att ekvationerna löses för varje kontrollvolym. Modellen kan därför ge detaljerad lokal information om brandförhållandena i utrymmet. CFD-modeller kan också hantera turbulenta gasflöden, vilka är karakteristiska för rumsbränder. Den stora fördelen med CFD-modellen i jämförelse med enklare modeller är att den kan användas för beräkningar av konsekvenser av brandförloppet i utrymmen där de andra modellerna är olämpliga. Exempel på sådana utrymmen är icke-rektangulära rum med lutande tak.



**Figur 5** Uppdelning av ett rum i kontrollvolym.

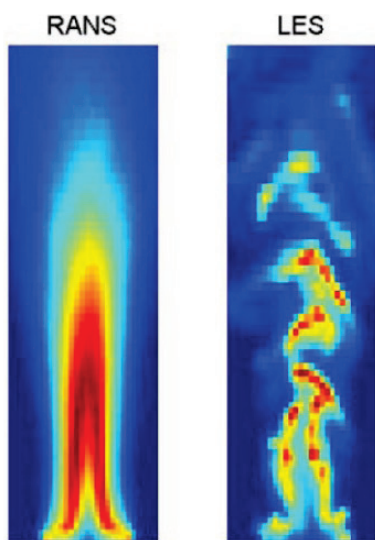
Det finns flera typer av modeller, kommersiella som ofta har ett brett användningsområde, t.ex. CFX, FLUENT, PHOENIX, och de som är speciellt utvecklade för att beskriva brand t.ex. SOFIE, SMAFS, FDS. De flesta modellerna var eller är fortfarande tidsmedelvärdesbildande av typen RANS (Reynold Average Navier-Stokes), som SOFIE och CFX. På senare år har en annan typ av modeller LES (Large Eddy Simulation) utvecklats som simulerar de stora

virvlarna och beräknar medelvärdet för de små. LES kräver stor datakraft om man vill simulera små virvlar. Exempel på denna typ av koder är FDS (Fire Dynamic Simulator) utvecklad vid NIST i USA och SMAFS (Smoke Movement And Flame Spread) utvecklad vid LTH. SMAFS finns även som i en RANS-variant.

Skillnaden mellan RANS och LES är fundamental och påverkar flera aspekter relaterade till simuleringarna kvalitet. I en RANS-modell beräknas Navier-Stokes flödesdynamiska ekvationer med ett tidsmedelvärde innan de lämnas över till den numeriska lösningsmodellen. Modellen tar sedan fram en "steady state"-lösning för ekvationerna. Tidsberoende flöden kan hanteras om tidsskalan för medelflödet är stor i förhållande till de turbulenta fluktuationerna. En LES-modell gör ingen tidsmedelvärdesbildning, utan lösningen har en direkt koppling till förhållandena vid den aktuella tidpunkten. Fluktuationerna som kan observeras mellan olika tidssteg är ett mått på de rörelser som den numeriska modellen kan hantera. En LES-modell rör sig framåt i tiden med ett kort tidssteg, vars längd bestäms av ett konvergenskriterium relaterat till lösningens stabilitet. Ju större hastighetsvektorer, desto kortare tidssteg.

Skillnaden mellan resultatet av RANS och LES illustreras i figur 6 där temperaturen i plymen ovanför en pölbrand har beräknats. RANS visar på liten fluktuation och ser nästan ut som en laminär flamma, medan LES tydligt visar tydliga virvlar och är mer att beakta som en ögonblicksbild av branden för det aktuella tidssteget. Dessa virvlar har en mycket stor betydelse för inblandningen av luft i brandplymen och RANS kan inte fånga upp dessa på samma direkta sätt som LES. LES anses därför vara en mer lämplig modell för de flöden som uppkommer vid bränder.

Det finns vissa tillämpningar då RANS har en klar fördel över LES. I RANS kan man ta hänsyn till på förhand känd information om medelflödets riktning och därmed tillåta att cellerna avviker från det 1:1:1-förhållande som LES kräver. Exempel på sådana simuleringar är tunnelbränder där RANS kan hantera långsmala celler, vilket är tidsbesparande. RANS kan också med fördel användas när branden är konstant under en lång tid och förhållandena i byggnad uppnår någon form av "steady state". Här kan RANS använda betydligt större tidssteg än vad som är möjligt med LES, vilket kortar simuleringstiden.



**Figur 6** En jämförelse mellan temperaturfält ovan en pölbrand i simuleringar utförda med RANS resp. LES (Hostikka, 2008).

I RANS löses all turbulens i submodeller, vilka har vissa problem med att på ett korrekt sätt uppskatta luftinblandningen i plymen. I LES finns också en turbulensmodell för att ta hänsyn till de rörelser som sker på en skala finare än cellens storlek. Luftinblandningen i plymen har en direkt koppling till beräkningens upplösning och är möjlig att förfinas på bekostnad av simuleringstiden. Om cellstorleken halveras ökar simuleringstiden c:a 16 ggr.

Fire Dynamics Simulator (FDS) är en CFD-modell som löser Navier-Stokes flödesdynamiska ekvationer numeriskt och är lämplig för flöde i låg hastighet, vilket drivs av termiska skillnader (McGrattan m.fl., 2010). FDS har utvecklats i huvudsak för att hantera transport av brandgaser och värme vid byggnadsbränder. För varje kontrollvolym löser FDS kontinuitetsekvationer för massa, rörelsemängd och energi. Några av de viktigaste submodellerna är de som hanterar förbränning, pyrolys och flamspridning, turbulens och strålning. Vissa av dessa submodeller är dock inte tillämpbara för praktisk dimensionering utan bör endast användas i forskningssyfte då dessa är förenade med ganska stor osäkerhet. Exempel på sådana submodeller är de som beskriver själva förbränningen dvs pyrolysmoeller och flamspridningsmodeller. Det gör att i dagsläget får användaren själv specificera brandförloppet. FDS gör transienta beräkningar av temperatur, densitet, tryck, hastighet samt brandgasernas sammansättning för varje kontrollvolym (cell). En simulering omfattar vanligen upp till någon miljon celler och tiotusentals tidssteg. FDS kan också beräkna temperatur och värmeflöde i konstruktioner.

FDS använder LES (Large Eddy Simulation) för att beräkna turbulens. Förbränningsmodellen i FDS är en s.k. "mixture fraction"-modell, vilken håller reda på hur massfraktionen bränsle fördelar sig i rummet. Förbränningen kontrolleras av förhållandet mellan syre och bränsle och förbränningsreaktionen sker så fort dessa två möts, oberoende av temperaturen. Eftersom modellen i sig själv utgår från att förbränningen sker momentant så har koden kompletterats med en empirisk korrelation som beskriver hur förbränningen påverkas om syretillgången är begränsad. Denna korrelation utgår från temperaturen och syrekoncentrationen nära flamma för att bestämma om förbränning är möjlig.

I en CFD-kod finns flertalet numeriska parametrar, vilka är viktiga för den analytiska lösningen av ekvationerna, men har liten eller ingen fysikalisk betydelse. När exempelvis temperaturen i det övre brandgaslagret ska beräknas används ett tidssteg (med enheten sekunder). Storleken på detta tidssteg har inget värde utanför beräkningsalgoritmen, men kan trots detta ha betydelse för resultatet.

FDS väljer tidssteg själv, baserat på ett konvergenskriterium och man bör i en känslighetsanalys undersöka om ett kortare tidssteg ger ett liknande resultat. Lösningarna ska konvergera mot ett visst värde när tidssteget görs kortare och kortare.

En av de viktigaste numeriska parametrarna i en fältmodell som FDS är storleken på kontrollvolymerna (cellerna). Kontinuitetsekvationerna löses numeriskt för varje kontrollvolym och en numerisk lösning är alltid att beakta som en approximation. Det innebär att efter ekvationerna har beräknats finns en restterm, vars storlek beror på cellens storlek. Ju större cell, desto större restterm. Denna restterm minskas med 4 ggr om cellstorleken halveras, vilket dock ger 16 ggr längre beräkningstid. Vilken cellstorlek som är lämplig beror på analysproblemet och vanligen krävs en känslighetsanalys för att avgöra detta.

Det finns en stark koppling mellan den optimala cellstorleken i FDS och brandens storlek. Det finns ett sätt att beskriva brandens storlek med ett dimensionslös tal, vilket i relaterat till brandens effektutveckling. Detta tal kallas för brandens karakteristiska diameter och beräknas med hjälp av nedanstående ekvation:

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

Där

$D^*$  = Brandens karakteristiska diameter

$\dot{Q}$  = Brandens effektutveckling, kW



$\rho_\infty$ ,  $c_p$ ,  $T_\infty$  = Densitet (1,2 kg/m<sup>3</sup>), värmekapacitet (1,0 kJ/kg/K) och temperatur hos luft (293 K).

$g$  = Tyngdaccelerationen, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

I många fall är  $D^*$  jämförbar med brandens faktiska diameter. Effektiviteten hos FDS:s lösningsmetod LES, vilken tidigare beskrivits, är beroende av kvoten mellan den karakteristiska diametern  $D^*$  och cellens storlek  $\delta x$ . Förenklat innebär detta att ju större kvot  $D^*/\delta x$  desto mer av de branddynamiska beräkningarna kan lösas utan inbladning av mindre precisa empiriska submodeller. Erfarenhet visar att en kvot på 5-10 ger tillfredsställande resultat. Dock ska det poängteras att kvoten i vissa fall bör vara 15-20, beroende av vilka brandfysikaliska egenskaper som är intressanta att studera (Ma & Quintiere, 2003). Valet av upplösning diskuteras vidare i kapitel 5.

Fältmodellerna kan ej heller hantera en fullt utvecklad brand.

### 2.3.4 Övriga modeller

Utöver de modeller som redovisas ovan finns sådana som är utvecklade för speciella ändamål t ex för att beskriva temperaturen i rummet i det fullt utvecklade brandförloppet, för beräkning av detektoraktivering och för beräkning av temperaturfält i konstruktioner med tillhörande bärförmågeanalys. Dessa kan också användas i samband med brandanalyser och ska självklart underkastas samma krav på visad användbarhet som de som denna rapport primärt behandlar. Dessa övriga modeller behandlas inte vidare i rapporten.

### 2.3.5 Verifiering och validering

All användning av brandmodeller kräver kunskap om vad modellerna klarar av och vilka begränsningarna modellerna har. Validering och verifiering av brandmodeller har varit föremål för en rad forskningsinitiativ de senaste åren. Dey (2010) redovisar erfarenheter från ”International Collaborative Fire Model Project (ICFMP)”, vilket syftade till att verifiera och validera datorprogram som används för brandanalyser i kärntekniska anläggningar. Studien fokuserar på hur väl datormodeller kan användas för att uppskatta hur en brand påverkar kritisk utrustning i form av kablar. Det kan konstateras att brandmodeller ofta kan uppskatta rumsvariabler som brandgaslagrets temperatur och höjd med tillfredsställande noggrannhet (10-20 % fel), medan specifika variabler som är viktiga för att bedöma brandens effekt på kritisk utrustning är betydligt mer svårbestämda. Det gäller främst när förbränningsförhållandena är underventilerade dvs när tillgången till syre är begränsad, Dey (2009).

Beräkningsalgoritmerna som används för att kvantifiera konvektiv värmeöverföring och värmestrålning från flammor och varma brandgaser till kablar är komplicerade och felen är ofta i storleksordningen 40-100 %. Anledningen till detta är att fysiken som ligger bakom dessa variabler inte tillräckligt väl förklarad och omsatt i analytiska uttryck.

FDS har också ingått i en svensk valideringsstudie inom ramen för projektet ”Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader”, (Holmstedt, Bengtson, Blomqvist, Dittmer, Hägglund, Tuovinen och van Hees, 2008). Valideringsstudien arbetade med fem olika scenarier vilka omfattade rum med brandgasventilation, tunnel, atrium, affärslokal, samt rum-korridor-rum. Resultaten av jämförelsen mellan experiment och simuleringar för scenarierna visade på ofullkomligheter såväl avseende tillgången till väldefinierade experimentella scenarier och mätresultat som samstämmighet mellan experiment med simuleringar med olika koder. Simuleringarna är behäftade med flera olika felkällor:

- ♦ Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m.) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- ♦ Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarioosäkerheter. Exempel på scenarioosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det

aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.

- ♦ Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag.

Detaljerade utvärderingar av jämförelserna mellan experimenten och simuleringarna visade:

- ♦ Avvikelsen mellan simuleringar och experiment beror både av typ av kod och av operatörens handhavande av koden (operatörsberoende). Man kan vanligtvis inte hänföra avvikelsen till typ av kod eller operatörshandhavande. Avvikelsen är en kombination av båda. Då CFD program är mycket komplicerade krävs goda kunskaper av operatören om kodens submodellers begränsningar och handhavande.
- ♦ Samtliga koder gav avvikelser inom cirka 20-30 % från experimenten som till största delen är att hänföra typ av kod. Val av indata av operatören gav i vissa fall större avvikelse.

Det är svårt för vissa koder att simulera strålningsförlusterna från branden på ett bra sätt om man inte använder mycket små gridnät och avancerade sotbildnings och strålningsmodeller.

För att få en bättre förståelse om vilken brandmodell som är lämplig för en specifik analysuppgift kan information från en omfattande validerings- och verifieringsstudie dokumenterad i NUREG-1824 (2007) användas. I NUREG-1824 redovisas värdefull information om kapaciteten hos handberäkningsmodeller, zonmodeller och fältmodeller. De modeller som ingick i studien var:

- ♦ Handberäkning:
  - Fire Dynamics Tools (FDTs) version 1805.0, utvecklad av US Nuclear Regulatory Commission (NUREG-1805, 2004).
  - Fire-Induced Vulnerability Evaluation model, revision 1 (FIVE-Rev1), utvecklad av EPRI och släppt i augusti 2002.
- ♦ Zonmodeller:
  - Consolidated Fire Growth and Smoke Transport (CFAST) Model, version 6.0.10, utvecklad av NIST i USA år 2005, Peacock (2008).
  - MAGIC version V4.1.1b, utvecklad av Electricité de France (EdF) och släppt i november 2005, Gay, Epiard och Gautier (2005).
- ♦ Fältmodell:
  - Fire Dynamics Simulator (FDS) version 4.06, utvecklad av NIST och släppt i juli 2004, McGrattan och Forney (2005).

Studien jämförde resultatet av simuleringar med uppmätta data från försök och i tabell 2 redovisas hur väl några av modellerna kan beräkna olika parametrar. För varje studerad parameter tilldelades modellen en färgkod; GRÖN eller GUL. Parametrar klassificerade som GUL kräver att användaren visar försiktighet, medan parametrar klassificerade som GRÖN anses ge tillfredsställande resultat, utan större osäkerhet än vad som finns i de utförda experimenten. Det finns även en kategori GUL+ vilken indikerar att osäkerheterna är lika stora som för kategori GUL men resultaten från modellen tenderar att vara konservativa dvs den ger resultat på säkra sidan. Oavsett färgkod måste användaren alltid försäkra sig om att simuleringen faller inom ramen för vad modellen är validerad för. Färgmarkeringen GRÖN



innebär inte att modellen är tillämpbar för alla scenarier där den aktuella parametern ska beräknas.

**Tabell 2 Resultat av validerings- och verifieringsstudien för olika brandmodeller.**

| Parameter                         |                   | FDTS | CFAST | FDS              |
|-----------------------------------|-------------------|------|-------|------------------|
| Övre brandgaslagrets temperatur   | Brandrummet       | GUL+ | GRÖN  | GRÖN             |
|                                   | Intilliggande rum | -    | GUL   | GRÖN             |
| Övre brandgaslagrets höjd         |                   | -    | GRÖN  | GRÖN             |
| Takstråletemperatur               |                   | GUL+ | GUL+  | GRÖN             |
| Plymtemperatur                    |                   | GUL  | -     | GUL              |
| Flamhöjd <sup>1</sup>             |                   | GRÖN | GRÖN  | GUL <sup>2</sup> |
| Syrgaskoncentration               |                   | -    | GRÖN  | GRÖN             |
| Sotkoncentration                  |                   | -    | GUL   | GUL              |
| Tryck i brandrummet <sup>3</sup>  |                   | -    | GRÖN  | GRÖN             |
| Temperatur på kritiska objekt     |                   | -    | GUL   | GUL              |
| Värmestrålning                    |                   | GUL  | GUL   | GUL              |
| Total värmetransport              |                   | -    | GUL   | GUL              |
| Väggtemperatur                    |                   | -    | GUL   | GUL              |
| Värmeflöde till omslutande väggar |                   | -    | GUL   | GUL              |

Valideringsstudien i NUREG-1824 bygger på en version (4.06) av FDS som skiljer sig på flera områden mot den version som finns tillgänglig nu. I oktober 2007 släpptes version 5 av FDS, vilket innebar flera stora ändringar av programkoden, framförallt avseende förbränningsmodellen. NIST introducerade också samling av verifierings- och valideringsdokumentation som kan användas för att dels kvalitetssäkra nya versioner av programkoden, samt användas av användarna för att söka information om hur väl modellen presterar i olika situationer. Nuvarande version av FDS (5.5.2) släpptes av NIST i september 2010 och under 2011 kommer FDS version 6 att släppas. I version 6 planerar NIST att förbättra bl.a. turbulensmodellen och väggmodellen. Vidare kommer FDS:s förmåga att hantera objekt med komplicerad geometri (McDermott m.fl., 2010). NIST rekommenderar användare att kontinuerligt uppdatera programvaran efterhand som nya versioner finns tillgängliga.

Mycket av det valideringsarbete som finns tillgängligt i bl.a. NUREG-1824 bygger således på version 4 av FDS. En väsentlig frågeställning blir därför hur väl det tidigare valideringsarbetet kan användas för att påvisa att FDS är en lämplig modell för ett aktuellt problem.

<sup>1</sup> Flamhöjden har bedömts med visuell observation.

<sup>2</sup> FDS använder inte en empirisk korrelation för att bestämma flamhöjden, utan nyttjar sin "mixture fraction"-modell för att avgöra förbränningszonens, dvs. flammans, utbredning.

<sup>3</sup> Det finns stora experimentella osäkerheter vid mätning av tryck i brandrummet.

Färgkoderna i tabell 2 finns inte längre kvar i valideringsdokumentationen för FDS 5. Dessa har ersatts med mer detaljerad information om standardavvikelser i förhållande till uppmätta experimentiella data. I FDS:s Technical Reference Guide - Vol. 3 Validation (McGrattan m.fl., 2010) finns en beskrivning av de valideringar som gjorts. Dokumentet redovisar också specifik information om hur väl FDS beräknar olika parametrar (bl.a. de som redovisas i tabell 2). NIST föreslår följande användning av valideringsdokumentet:

1. Studera kapitel 2 i FDS Technical Reference Guide (Vol. 3) för att se vilka valideringar som gjorts tidigare för användningsområden som liknar uppgiften i aktuell brandanalys.
2. Använd kapitel 3 i FDS Technical Reference Guide (Vol. 3) för att se vilken experimentell uppsättning som bäst stämmer överens med uppgiften i aktuell brandanalys.
3. Studera de kapitel för de variabler som är av intresse för aktuell brandanalys.

Färgkodningen i tabell 2 är fortfarande relevant för att ge användaren en uppfattning om modellens förmåga. Dock är det viktigt att gå igenom ovanstående tre steg när modellens lämplighet ska bedömas.

Den mesta valideringen av datormodeller har gjorts för välventilerade förhållanden. För att validera olika brandmodeller för förutsättningar som är vanliga inom kärntekniska anläggningar har ett initiativ inom ramen för OECD tagits för att förbättra kunskapsunderlaget. Detta projekt, PRISME, har haft som ett mål att undersöka modellers förmåga att beskriva experiment som genomförts vid underventilerade förhållanden, Audouina m fl (2011). Ett första steg i projektet är att definiera på vilket sätt som en validering kan genomföras och hur en jämförelse mellan experiment och beräkning ska beskrivas. Artikelnen föreslår att olika jämförelseparametrar ska användas för att både beskriva en modells globala och lokala förmågor att återge experimentens resultat och förklara avvikelserna.

Det som också konstateras i Audouina m fl (2011) är att de sk användarfelen var betydelsefulla och att den delen av osäkerheten bör analyseras vidare. Stora fel kan inträffa om simuleringen ska beskriva situationen med underventilerade bränder och samtidigt beakta interaktion mellan brand och ventilationssystem. I PRISME-arbetet kunde enbart bra resultat visas när användaren hade tillgång till experimentella data för både av brandeffekt och ventilationsförhållanden<sup>4</sup>. I detta fall var felet för CFD-beräkningarna ändå ibland mer än 30 % för temperatur, 40 % för syrgaskoncentration, 100 % för trycket och 150 % för ventilationsflödet, alltså trots kännedomen om de experimentella resultaten. Felet för beräkningarna med zonmodellerna var ännu större. Eftersom det handlar om simuleringar där samma mjukvara användes av flera personer ger det en första indikation kring användarfelet.

Projektet är fn pågående och preliminära resultat ger en indikation om att flera modeller har svårigheter att korrekt prediktera de experimentella resultaten.

I kapitel 3 redovisas olika kärnkraftsspecifika scenarier tillsammans med rekommenderade brandmodeller. Där ges kompletterande information till vad som är viktigt att beakta när en specifik modell ska användas.

## 2.4 Steg 4: Beräkna brandförloppet

Detta steg omfattar själva simuleringen där brandförloppet beräknas och utdata i form av temperatur, siktbarhet, värmestrålning etc. samlas in. Om datormodeller används rekommenderas följande arbetsgång:

1. Förbered indatafilen. Vilka indata som behövs för att köra en modell är beroende av scenariot och modellen. I kapitel 3 redovisas några typscenarier för brandtekniska analyser

---

<sup>4</sup> Personlig kommunikation med P van Hees, Brandteknik och riskhantering, LTH 2011-07-01

där det anges vilken indata som behövs. Vidare bör manualerna till det datorprogram som ska användas studeras för att förstå vilka indata som är specifika för den aktuella modellen. I avsnitt 5.5 redovisas en vägledning för indata till FDS.

2. Bestäm vilken utdata som är betydelsefull. Detta är speciellt viktigt vid användning av fältmodeller då dessa endast samlar in det utdata som användaren specificerat. Vissa utdata är viktiga för att kunna kontrollera beräkningsresultatet. Exempel på sådana utdata för FDS ges i avsnitt 5.5.7.
3. Kör datormodellen. Simuleringstiden för en zonmodell rör sig om minuter, beroende av beräkningens komplexitet och datorns prestanda. Fältmodeller kan ta timmar eller dagar för att utföra en simulering. Simuleringstiden ökar med analysuppgiftens komplexitet och om stora strömningshastigheter förväntas, t.ex. vid användning av mekanisk ventilation eller flera bränder. Hur lång tid av brandförloppet som simuleringen ska omfatta beror på själva scenariot och anges av användaren. I detta skede måste modellosäkerheten dvs modellens förmåga att beskriva verkligheten beaktas.

Handberäkningsmodeller kan sättas upp antingen i ett kalkylprogram eller direkt på papper och resultatet beräknas relativt snabbt med ett minimalt behov av indata. Om handberäkningsmodeller ska användas för tidsberoende parametrar rationaliseras arbetet om ett kalkylark används, vilket dock kräver ett visst mått av programmering.

## 2.5 Steg 5: Värdera resultatet

Detta steg är förhållandevis enkelt och handlar enbart om att avgöra om resultatet från beräkningen uppfyller den målsättning med analysen som definierats i avsnitt 2.1. Värderingen av resultatet besvarar frågeställningen beskriven i analysens målsättning med ett ”ja” eller ett ”nej”. Ett negativt svar leder direkt till att skyddssystemen måste förändras och analysen upprepas från steg 2.

## 2.6 Steg 6: Känslighets- och osäkerhetsanalys

En analys av resultatets känslighet och de osäkerheter som beräkningarna är förknippade med är ett viktigt steg för att analysresultatet ska bli trovärdigt. Modeller är baserade på förenklingar av verkligheten och en idealisering av brandförloppets dynamik. Det är därför naturligt att dessa modeller har en modellosäkerhet som behöver beaktas i analysarbetet. Vidare är flera av de indata som behövs för att köra en modell baserade på generella data eller ingenjörsmässiga bedömningar, vilket skapar ett behov av att studera resultatet känslighet för denna typ av osäkerheter.

I alla variabler som beräkningar baseras på förekommer en osäkerhet om vilket värde variabeln har. I en scenarioanalys utgår man dock vanligen från ett i varierande grad konservativt val för de ingående variablerna. Trots detta kan en viss variation kring detta valda värde behöva analyseras i känslighetsanalysen för att på så sätt få ett underlag för att kunna bedöma robustheten i analysens resultat.

Variationen för en variabel kan bero på att variabelns värde varierar till följd av naturlig variation t.ex. utomhustemperaturen. Men variationen kan också bero på att man är osäker på vilket värde som är det riktiga på grund av att man saknar tillräckliga kunskaper om variabeln t.ex. spridningshastigheten för brandgaser i rummet eller modellosäkerhet. I de flesta fall finns det inte så mycket kunskap att det ens går att fastställa ett exakt värde utan man får nöja sig med att försöka se till att variationen är liten eller att i alla fall vara medveten om att det finns en variation.

Det är nödvändigt att visa vilka osäkerheter som finns i analysresultaten, hur stora de är, på vilket sätt de påverkar resultatet och hur de har beaktats. Syftet är att på ett kvantitativt sätt identifiera de variabler som har störst påverkan på resultatet, dvs. de som med en liten förändring kan ge ett stort utslag i resultatet. Vid känslighetsanalyser med relativa jämförelser

mellan olika utformningar av en skyddsfunktion behöver inte de variabler tas med, som kan antas ha samma värde och som påverkar resultatet på samma sätt. Ett traditionellt sätt att utföra känslighetsanalys på är att studera påverkan på resultatet då en variabel i taget varieras. Dessa variabler beskrivs då med ett troligt högsta och ett troligt lägsta värde, tillsammans med det som utgör det sk grundvärdet. Genom att låta alla variabler utom en anta grundvärdet kan effekten på resultatet avläsas när den undersökta variabeln ändras inom sitt intervall. Detta upprepas för varje variabel.

Om variationen mellan en variabels maximala och minimala värde endast ger en marginell effekt på det förväntade värdet (resultatet av analysen) behöver inte denna variabel behandlas vidare. I scenarioanalysen får det göras en bedömning av om variabeln är tillräckligt väl beskriven för att hantera den möjliga osäkerheten. Ett annat alternativ är att utöka graden av skyddsmekanismer för att på det viset minska sannolikheten att extrema värden förekommer alltför frekvent.

Det ska nämnas att scenarioanalysen bygger på en bedömning av den ingående osäkerheten och det kan därför vara svårt att få en överblick över den sammanlagda osäkerheten. Genom att i stället använda en metod kallad utökad/fullständig riskanalys kan man kombinera olika osäkerheter genom att tilldela variablerna statistiska fördelningar i stället för punktskattningar.

Känslighets- och osäkerhetsanalysen avslutas med en bedömning om resultatet anses vara tillfredsställande, dvs. om analysens målsättning fortfarande bedöms uppfyllas. Vid ett negativt svar behöver skyddssystemen förändras och analysen upprepas från steg 2. Vid ett positivt svar fortsätter arbetet med en dokumentation av analysen, se steg 6.

Ovanstående beskrivning av osäkerheter relaterar i huvudsak till sådana osäkerheter som kan förknippas med data och parametrar. En annan grupp av osäkerheter som är relevant för brandanalysens kvalitet är den som relaterar till modeller och dataprogram. Modeller har en begränsad förmåga att kunna återspegla realiteten. Det behövs alltid en del antaganden och förenklingar vid användning av modeller. Denna typ av osäkerhet är mycket svårare att hantera än osäkerheter kopplat till data och parametrar, vilket också konstaterades i valideringsstudien inom PRISME, se avsnitt 2.3.5. Det innebär att användningen av modellering som teknik leder till att tre typer av osäkerheter måste beaktas; osäkerhet i indata, modellosäkerhet samt användarinducerad osäkerhet. Denna sista typ av osäkerhet är kopplad till variationer i hur problemet går från kvalitativ beskrivning till en kvalitativ tolkning av problemet. Flera sätt att hantera dessa problem kan diskuteras t ex användning av generella manualer, parallell användning av olika modeller och tillvägagångssätt, regelbaserad modellering, utökning av kunskap om modellbegränsningar samt användning av erfarenhet och expertbedömningar. Att valda modeller är validerade och verifierade (se avsnitt 2.3.5) är att beakta som en grundläggande förutsättning.

## 2.7 Steg 6: Dokumentation

Den brandtekniska analysen ska dokumenteras på ett sätt som underlättar kontroll, kvalitetssäkring och spårbarhet. Dokumentationens omfattning styrs i hög grad av vilken modell som använts. Handberäkningsmodeller kräver ganska kortfattad dokumentation, medan fältmodeller ställer mer omfattande krav.

Beskrivningen av brandscenarierna (urvalsprocessen samt de representativa scenarierna) bör vara så pass tydlig att informationen kan användas i framtida analyser. De kärntekniska anläggningarna förändras inte särskilt mycket över tiden och det finns en vinst i att kunna återanvända scenarier vid framtida analyser. Brandscenarierna baseras ofta på lokal information som inhämtas vid platsbesök, samt mer allmän information tillgänglig i litteraturen.

Det är viktigt att observationerna vid platsbesök dokumenteras tydligt med ritningar, skisser och tabeller där data viktiga för scenariobeskrivningen finns med. Sådana data berör tändkällor, brännbart material, kritisk utrustning och befintliga brandskyddssystem.

Nedan beskrivs en struktur som är lämplig när brandtekniska analyser ska dokumenteras:

#### 1. Målsättning

Beskrivs tydligt analysens målsättning och syfte. Vilka säkerhetsfrågor avser analysen att besvara dvs vad analyseras och varför genomförs analysen?

#### 2. Referenser

Varifrån kommer information om de indata som ingår i analysen? Ange referenserna i löpande text, t.ex. ”värmeledningsegenskaper för betong, se Referensen (2009)”.

#### 3. Indata

Beskriv de indata som används i analysen. Behovet av indata för olika typscenarier finns redovisade i kapitel 3. Glöm inte bort att ange referenser för samtliga data.

#### 4. Brandscenarier

Beskriv de brandscenarier som ingår i analysen. Beskrivningen ska omfatta både urvalsprocessen, grupperingen samt val av representativa scenarier. Exempelvis bör följande beskrivas för en pölbrand; effektutveckling, utspilld volym, pölens yta och bränslekaraktäristiska.

#### 5. Antaganden och förenklingar

Beskriv eventuella ytterligare antagande och förenklingar som gjorts i analysen. Ange exempelvis hur sneda väggar eller sluttande tak har hanterats i en modell som enbart kan arbeta med rätblock.

#### 6. Sammanfattning av resultat

Redovisa och diskutera beräkningarnas och analysens resultat med hjälp av figurer, tabeller, fotografier, ritningar, etc.

#### 7. Slutsatser

Beskriv analysens slutsatser. Uppfylldes målsättningen med analysen eller fanns det behov av att komplettera brandskyddet med ytterligare säkerhetssystem?

#### 8. Bilagor

Det kan finnas ett behov av att redovisa indatafiler till brandmodellerna, men även ritningar och resultat från andra typer av analyser, t.ex. en tidigare utförd riskidentifiering. Om handberäkningsmodeller använts kan redovisas i detalj i en bilaga.

## 2.8 Steg 7: Granskning (kontroll)

Granskning eller kontroll av en brandteknisk analys är ett betydelsefullt inslag för att säkerställa tillräcklig kvalitet. Granskningen regleras i SSMFS 2008:1 (2009) och syftar till att ”...säkerhetsaspekter är beaktade, och att tillämpliga säkerhetskrav på anläggningens konstruktion, funktion, organisation och verksamhet är uppfyllda...”. Granskningen ska utföras i två steg – utförarens egenkontroll och kontroll av en tredje part (s.k. peer-review). Egenkontrollen, eller den primära säkerhetsgranskningen (PSG) sker löpande i projektet, medan tredjepartskontrollen, eller den fristående säkerhetsgranskningen (FSG), ofta sker när stora delar av analysarbetet har utförts. En tredjepartskontroll görs utifrån ett mer övergripande syfte relaterat till hur lagar, förordningar och föreskrifter uppfylls. Egenkontrollen måste däremot ske på alla nivåer, där stor vikt läggs på analysens förutsättningar och genomförande.

### 2.8.1 Egenkontroll

Löpande egenkontroll (PSG) i samband med verifiering av en brandteknisk analys är betydelsefullt för att säkerställa att analysens målsättning och syfte uppnås. Kontrollen bör ske parallellt med själva analysarbetet och punkter som kan vara relevanta att kontrollera finns i

sammanställda i tabell 3, se även SSMFS 2008:1 (2009) 4 kap 3 § inklusive tillhörande allmänna råd.

**Tabell 3 Relevanta punkter vid egenkontroll av brandtekniska analyser.**

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontroll av syfte och målsättning       | Kontroll av att analysens syfte och målsättning har definierats tydligt i dokumentationen                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Kontroll av indata                      | Definition av indata och/eller referens till datakällor. Relevans av data med avseende på aktuell användning. Tillförlitlighet av data.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Kontroll av antaganden och förenklingar | Definition av antaganden och förenklingar.<br>Relevans av antaganden och förenklingar.<br>Konsistens med andra antaganden, förenklingar och data som används i analysen.                                                                                                                                                                                                                      |
| Kontroll av beräkningar                 | Verifiering av använda beräkningsmoduler och dataprogram.<br>Bedömning av relevans av modeller med avseende på aktuell tillämpning.<br>Bedömning av begränsningar av använda modeller med avseende på indata.<br>Kontrollräkning av modeller som har tagits fram för aktuell tillämpning (exempelvis Excel-spreadsheets).<br>Kontrollräkning av handberäkningar.<br>Beaktande av osäkerheter. |
| Kontroll av slut-dokument               | Korrekturläsning av text, tabeller och sidnumrering.<br>Kontroll av numeriska värden.<br>Kontroll av grafisk läsbarhet av figurer.<br>Kontroll av slutsatsernas relevans för studien (uppfyllelse av syfte och mål).                                                                                                                                                                          |
| Vid projektets start                    | Allmän metodik, inklusive mål och problemdefinition.<br>Grundläggande metoder som ska användas för analysen.<br>Identifikation av händelser som ska inkluderas i analysen.                                                                                                                                                                                                                    |
| Under analysens gång                    | Huvudsakliga resultat.<br>Sammanfattningar, slutsatser, beskrivning av resultat och rekommendationer.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Som avslutning på den löpande egenkontrollen bör analysen genomgå en slutlig egenkontroll, där samma punkter som redovisas i tabell 3 kan användas. Ansvarig för den slutliga kontrollen ska vara en eller flera personer som har lämplig kompetens och erfarenhet och som annars inte är involverade i den projektering som ska granskas. Kontrollen bör omfatta alla dokument som ska levereras efter färdigställd analys, inklusive alla tillhörande relevanta underlag.

Kontrollen bör dock fokusera på analysens huvudsakliga målsättningar, problemdefinition, använda metoder, acceptanskriterier och analysens slutsatser. Av slutdokumentationen ska framgå att egenkontroll är utförd och vem som är ansvarig för denna.

### 2.8.2 Tredjepartskontroll

Tredjepartskontrollen (FSG) ska komplettera den inledande egenkontrollen. Tredjepartskontrollen kan göras av hela analysen och omfatta tillämpliga föreskrifter och standarder, lämpligheten i antaganden, indata och beräkningsmetoder, samt om verifieringen

omfattar nödvändiga aspekter och rätt slutsatser har dragits. Ett genomgående tema måste vara hantering av osäkerheter och konsekvens av dessa. Det är också möjligt att göra en tredjepartskontroll på endast en mindre del av projektet, t.ex. kvantifiering av brandförloppet och beräkning av kritisk påverkan vid brand. Oavsett om tredjepartskontrollen görs för hela projekteringen eller delar av den så ska kontrollanten gå igenom de punkter nedan som är relevanta för kontrollen, se även SSMFS 2008:1 (2009) 4 kap 3 §:

- ♦ Tillämpbara föreskrifter, standarder och handböcker.
- ♦ Målsättning med brandskyddet.
- ♦ Antaganden gjorda av projektören i samband med verifieringen, t.ex. definitioner av kritisk påverkan, tolkning av erfordrade brandscenarier, materialegenskaper och mänskligt beteende.
- ♦ Vald dimensioneringsmetodik.
- ♦ Metoder och modeller som verifieringen grundar sig på.
- ♦ Val av indata.
- ♦ Lämplighet i rekommendationer och slutsatser, med hänsyn till resultatet av verifieringen.
- ♦ Kontroll av verifieringens tekniska utförande för att identifiera eventuella matematiska fel eller fel i tolkning av in- och utdata.

Det är viktigt att den som utför tredjepartskontrollen har ett objektiv förhållningssätt och inte har några intressen som står i konflikt med kontrollens utförande och det aktuella projektet. Kontrollanten måste ha tillräcklig kompetens inom brandingenjörsvetenskap för att kunna utvärdera föreslagen lösning och metodik. Kontrollanten bör ej heller vara anställd på samma företag som utföraren.

Ett sätt att avgöra om kontrollanten har tillräcklig kompetens är genom att bedöma om kontrollanten själv har förmågan att utföra motsvarande dimensionering.





### 3 Vägledning vid modellering av brandscenarier

Detta kapitel avser att ge specifik vägledning och rekommendationer vid modellering av brandscenarier som är specifika för kärntekniska anläggningar. Kapitlet redovisar exempel på krav och målsättningar samt hur scenarier kan karakteriseras för att underlätta valet av modell. Vidare ges vägledning kring beräkningsstrategier, lämpliga brandmodeller samt stöd i hur brandscenarierna ska beskrivas för att skapa rätt indata och förutsättningar vid modellering.

#### 3.1 Krav och målsättningar

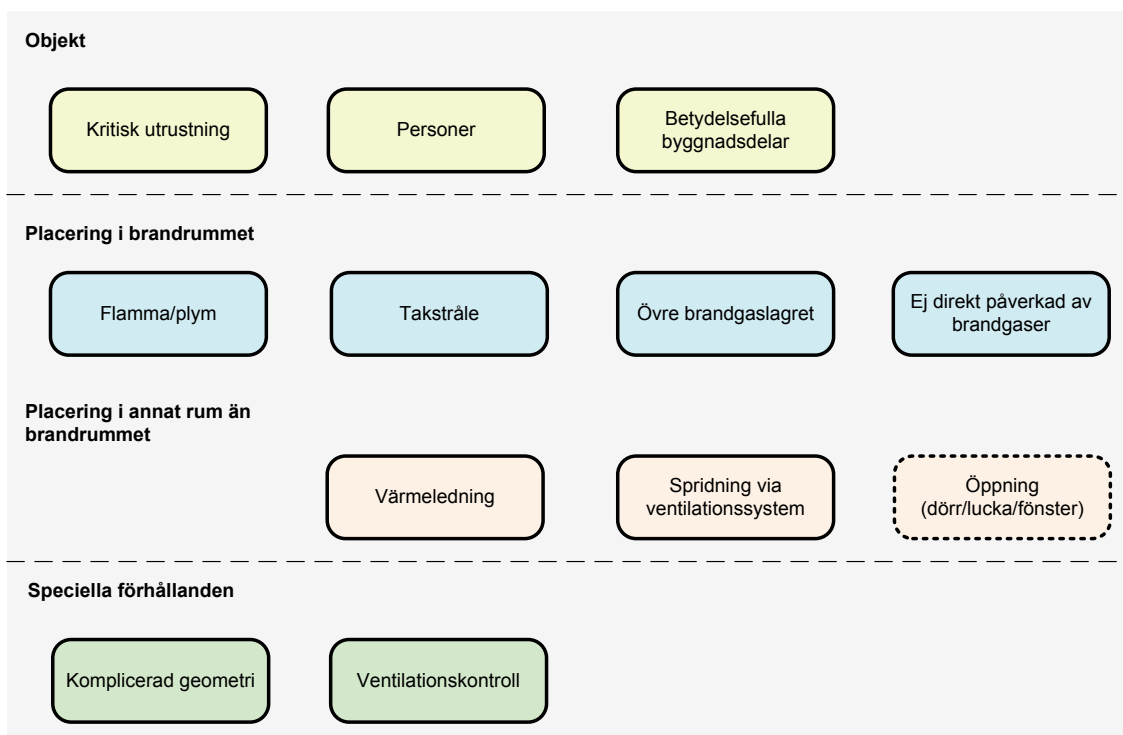
Att välja brandmodell handlar mycket om vilken eller vilka variabler som ska kvantifieras. För att kunna ge stöd i valet av modell studeras vilka syften som brandskyddet har i kärntekniska anläggningar. Fredholm (2010) har undersökt den nationella kravbild avseende brandskydd på kärnkraftverk och hur dessa tillämpas i svensk kärnkraftindustri. I arbetet identifieras bl.a. följande syften, vilka kan ge skador på kritisk utrustning, personer eller byggnaden:

- ♦ Förhindra påverkan på redundant utrustning placerad i *samma brandcell* och *samma rum*.
- ♦ Förhindra påverkan på redundant utrustning placerad i *skilda brandceller* eller *i olika rum*.
- ♦ Möjliggöra *användning av utrymningsvägar* under hela brandförloppet samt efter brand för att förflytta sig inom anläggningen.
- ♦ Förhindra omfattande konsekvenser av *brand i kabelutrymmen*.
- ♦ Förhindra omfattande konsekvenser av *brand i oljor* mm.

Ovanstående syften behöver analyseras mer djupgående för att kunna välja vilken brandmodell som är mest lämplig. Det är nämligen detaljeringsgraden i den sökta variabeln som avgör vilka modeller som är lämpliga att använda. Flertalet modeller kan med tillfredsställande precision beskriva övergripande variabler som brandgaslagrets höjd och temperatur, medan detaljerad information som temperaturen i en viss punkt eller infallande strålning mot ett kritiskt objekt kräver mer avancerade modeller.

#### 3.2 Karakterisering av modelleringsscenarier

Syftet med indelningen i olika modelleringsscenarier är att kunna förstå hur scenariots karakteristika påverkar valet av brandmodell samt vilka kvalitetsparametrar som är relevanta för just detta scenario. Valet av brandmodell styrs i huvudsak av brandfysikens komplexitet för det aktuella scenariot. I figur 7 visas ett förslag till parametrar av betydelse vid karakterisering av modelleringsscenarierna.



**Figur 7 Variabler betydelsefulla att beakta vid karakterisering av olika modelleringsscenarier.**

Tre olika typer av "objekt" har identifierats; kritisk utrustning, personer och betydelsefulla byggnadsdelar. Med kritisk utrustning avses sådan utrustning vars funktion är intressant att utvärdera i händelse av brand. Det kan handla om kablar, apparatskåp eller liknande. För den kritiska utrustning ska skadekriterier definieras, vilket vanligen blir en maximal temperatur som utrustningen får utsättas för. Även detektorer för aktivering av skyddssystem kan beaktas som kritisk utrustning i detta fall då dessa i många fall styrs av temperaturen i brandrummet. Personer i byggnaden är också att beakta som skyddsvärdiga "objekt" i sammanhanget för vilka det finns etablerade kriterier vilka inte får överskridas för att möjliggöra utrymning och undvika skada. Även betydelsefulla byggnadsdelar kan behandlas som objekt, givet att det finns ett särskilt skyddsmål för dessa. Exempelvis kan en analysuppgift vara att undersöka hur den bärande konstruktionen i en turbinhall påverkas av effekterna från en pölbrand. Skadekriterier för betydelsefulla byggnadsdelar kan också uttryckas i form av kritisk temperatur.

Objektens placering är avgörande för valet av brandmodell då modellernas prediktiva förmåga skiljer sig åt relaterad till var objektet befinner sig i förhållande till branden, plymen och brandgaserna. I figur 7 redovisas ett antal fall, grupperade i huruvida objektet befinner sig i brandrummet eller i ett angränsande avskilt rum. Notera att objekt i ett angränsande rum där det finns öppningar till brandrummet i vissa fall är att beakta som om objektet befinner sig i själva brandrummet. Utöver typ av objekt och dess placering i förhållande till branden finns ett antal specialfall, vilka i huvudsak relaterar till valet av brandmodell.

Om rummet har en komplicerad geometri påverkar detta val av brandmodell i stor uträkning. Med komplicerad geometri avses inte enbart den geometriska utformningen, utan även om det finns installationer i rummet som påverkar flammen/plymens utbredning samt spridningen av brandgaser. Ytterligare ett specialfall är om branden är ventilationskontrollerad.

### 3.3 Beräkningsstrategier och brandmodellers lämplighet

I avsnitt 3.2 visas att ett modelleringsscenario karakteriseras av vilken typ av objekt som analysen avser, var objektet är placerat i förhållande till branden samt om det råder något speciellt förhållanden. Det första steget i den brandtekniska analysen (se avsnitt 2.1) handlar om

att definiera analysens målsättning och ytterligare exempel på några övergripande målsättningar med brandtekniska analyser redovisas nedan:

- ♦ Beräkna tid till skada för kablar placerade i en kabelstege...
  - ... vilken är placerad rakt ovanför ett elskåp.
  - ... som finns inuti det övre brandgaslagret i ett avgränsande rum.
- ♦ Avgöra tillgänglig tid för utrymning av ett kontrollrum för att personer ska kunna utrymma tryggt.
- ♦ Beräkna tid till detektion av en värmedetektor, som kan är avskärmd från branden pga. rummets utformning och inredning.
- ♦ Beräkna vilken temperatur som den bärande konstruktionen exponeras för vid en brand i ett närliggande elskåp.

I tabell 4 redovisas lämpliga modeller för val av brandmodell baserat på modelleringsscenariots karakteristika, givet att objektet befinner sig i brandrummet.

**Tabell 4** Redovisning av lämpliga brandmodeller som en funktion av modellerings-scenariots karakteristika, givet att objektet är *placerat i brandrummet*.

|                                                                 | Flamma/plym                              | Takstråle                   | Övre brandgas-lagret    | Ej direkt påverkad av brandgaser         |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
| <b>Kritisk utrustning/<br/>betydelsefulla<br/>byggnadsdelar</b> | Handberäkning<br>Zonmodell<br>CFD-modell | Handberäkning<br>CFD-modell | Zonmodell<br>CFD-modell | Handberäkning<br>Zonmodell<br>CFD-modell |
| <b>Personer</b>                                                 | -                                        | -                           | Zonmodell<br>CFD-modell | Zonmodell<br>CFD-modell                  |
| <b>Komplicerad geometri</b>                                     | CFD-modell                               | CFD-modell                  | CFD-modell              | CFD-modell                               |
| <b>Ventilationskontrollerad brand</b>                           | CFD-modell                               | CFD-modell                  | CFD-modell              | CFD-modell                               |

Om objektet är placerat i ett rum som är avskilt från brandrummet med brandcellsgräns eller motsvarande kan val av modell ske enligt tabell 5. Notera att tabell 5 inte är tillämplig om det finns öppningar mellan brandrummet och det angränsande rummet där brandgaser kan flöda

fritt. Om sådana öppningar existerar ska modell väljas i enlighet med rekommendationerna i tabell 4.

**Tabell 5** Redovisning av lämpliga brandmodeller som en funktion av modellerings-scenariots karakteristika, givet att objektet är *placerat i ett angränsande rum* som är brandtekniskt avskilt eller utformat så att brandgaser inte kan strömma fritt.

|                                                                 | Värmeledning                             | Spridning via ventilationssystemet |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Kritisk utrustning/<br/>betydelsefulla<br/>byggnadsdelar</b> | Handberäkning<br>Zonmodell<br>CFD-modell | <sup>5</sup>                       |
| <b>Ventilationskontrollerad brand</b>                           | Handberäkning<br>CFD-modell              | <sup>5</sup>                       |

### 3.3.1 Allmänt om beräkningsstrategier

I detta avsnitt redovisas ett antal frågeställningar/råd som kan nyttjas när beräkningsstrategin ska fastställas.

#### **Objektets placering**

- ♦ Om ett objekt är placerad rakt ovanför branden, utsätts det för direkt flampåverkan eller omfattas det av brandplymen? Objektet utsätts för direkt flampåverkan om avståndet mellan branden och objektet är mindre än brandens flamhöjd. Om objektet är placerat på större avstånd från branden än flamhöjden så anses det befinna sig i brandplymen.
- ♦ Det är viktigt att beakta huruvida den initiala branden sprids till annat närliggande brännbart material efter som det är brandens totala effektutveckling som bestämmer det övre brandgaslagrets temperatur.
- ♦ I vissa fall är det nödvändigt att titta på värmetransport från det övre brandgaslagret till ett objekt. Om objektet är nära tändkällan är detta ofta inte nödvändigt, men om avståndet i höjddled är stort kan det övre brandgaslagrets temperatur ha en betydelse för uppvärmningen av objektet. Om så är fallet ska analysen ta hänsyn till rummets geometri, material i omslutande konstruktioner samt ventilationsförhållandena.

#### **Beräkning av tid till skada**

Beräkning av tid till skada genom att antingen:

- ♦ Beräkna den tid det tar för temperaturen<sup>6</sup> i brandplymen eller det övre brandgaslagret att bli större än skadekriteriet.

---

<sup>5</sup> Notera att det krävs särskilda datormodeller för att kunna beräkna strömning och spridning av brandgaser i ventilationssystem. Exempel på sådan modell är PFS (Jensen, 1996).

- ♦ Beräkna temperaturen<sup>6</sup> i objektet med kännedom om objektets värmeledningsegenskaper och det värmeflöde som flammen, brandplymen eller det övre brandgaslagret ger. Jämför beräknad temperatur med skadekriteriet.

#### ***Beräkning av tid för detektion***

För fritt placerade (ej avskärmade) rökdetektorer rekommenderas följande beräkningsstrategi:

- ♦ Bestäm detektors placering i förhållande till branden.
- ♦ Beräkna detektionstiden med en lämplig modell,

För avskärmade rökdetektorer rekommenderas följande beräkningsstrategi:

- ♦ Beräkna det övre brandgaslagrets temperatur och höjd som en funktion av tiden. En rökdetektor förväntas att aktivera strax efter att brandgaser når runt det föremål som avskärmar detektorn.
- ♦ Bestäm detektionstiden som den tidpunkt då brandgaserna når detektorn.

Strategin är liknanden för värmedetektorer med skillnaden att hänsyn måste tas till värmedetektorns tröghet (RTI-värde).

#### ***Brandpåverkan av bärande konstruktioner***

De brandmodeller som redovisas i denna manual kan användas för att ge en indikation vilken temperatur som den bärande konstruktionen utsätts för. Denna information är ofta inte tillräcklig för att avgöra om bärförmågan kommer att vara otillräcklig vid brandpåverkan. En fullständig strukturanalys kan vara nödvändig om sådan information eftersträvas.

### **3.3.2 Brandmodellernas lämplighet**

#### ***Handberäkning***

Ekvationer för handberäkning är lämpliga för scenarier där objekt befinner sig nära branden i dess plyn eller takstrålen, och där värmetransport från det övre brandgaslagret spelar liten roll. Exempelvis kan Heskestads korrelationer för plymtemperatur (Heskestad, 2008) användas för att bestämma vilken temperatur som en konstruktion placerad rakt ovanför branden utsätts för. Korrelationerna kan dock inte tillämpas om objektet är placerat högt ovanför branden och hänsyn måste tas till värmetransport från det övre brandgaslagret.

Vissa handberäkningsmodeller t.ex MQH-metoden (Walton & Thomas, 2008) för bestämning av det övre brandgaslagrets temperatur kan användas för en första analys i syfte att avgöra om brandgaserna är tillräcklig varma för att skadekriteriet skulle kunna överskridas. Handberäkningsmodeller också lämpliga att använda för att bedöma aktiveringstider för fritt placerade (ej avskärmade) detektorer.

Handberäkningsmodeller är däremot otillräckliga när det gäller att bedöma effekter i angränsande rum eller i rum med komplicerad geometri, samt då branden förväntas bli ventilationskontrollerad.

#### ***Zonmodeller***

Zonmodeller är effektiva verktyg i utrymmen med enkel geometri. Rumsgeometrierna ska kunna förenklas till rätblock. Zonmodeller är skapade för att titta på transport av värme och brandgaser och ger denna utdata för varje rum som ingår i beräkningsdomänen. Zonmodeller är

---

<sup>6</sup> Det är inte nödvändigtvis temperaturen som är det dimensionerande skadekriteriet. Se avsnitt 4.1 för mer information.

lämpliga och kan utifrån ett användardefinierat brandförlopp utvärdera olika parametrar som siktbarhet, toxicitet, temperatur och värmestrålning.

Zonmodeller har ofta en speciell modell för att hantera uppvärmning av objekt som är placerade i brandplymen eller i flammen. I modellen kan hänsyn tas till objektets värmeledningsegenskaper och zonmodellen kan ta hänsyn till inverkan av det övre brandgaslagret när temperaturen i objektet ska beräknas. Dessa modeller är därför lämpliga att använda för då värmetransporten från det övre brandgaslagret samverkar med brandplymen i uppvärmning av objektet. Modellerna kan också med kännedom om brandgaslagrets temperatur beräkna värmetransport till objektet, dess ytemperatur samt innertemperatur som en funktion av tiden.

Zonmodeller har ofta en speciell modell för beräkning av tid för aktivering av detektorer. De kan däremot inte ta hänsyn till komplicerad geometri och inredning som påverkar strömningen av brandgaser. Vidare har modellerna svårt att ge ”lokal” information om de brandfysikaliska variablerna pga. av dess förenkling i ett övre varmt brandgaslager och ett nedre lager med frisk luft.

### **CFD-modeller**

CFD-modeller rekommenderas i huvudsak för komplicerade geometrier där rummets utformning och inredning gör andra modeller olämpliga. Modellerna är även lämpliga att använda om det finns ”hinder” mellan branden och objektet, vilka stör strömningen av brandgaser och själva värmetransporten. CFD-modeller bör också användas om branden förväntas bli ventilationskontrollerad eller om mekanisk brandgasventilation är en del av brandskyddskonceptet. I avsnitt 3.5 finns ytterligare vägledning beträffande ventilationskontrollerade bränder och i kapitel 5 anges viktig information som ska beaktas vid användning av CFD-modellen Fire Dynamics Simulator (FDS).

## **3.4 Vägledning vid beskrivning av brandscenarier**

### **3.4.1 Tändkälla (dvs. branden)**

Följande aspekter avseende tändkällan är relevanta att beakta:

- ♦ Identifiera bränslet och beskriv dess maximala effektutveckling. Vägledning finns i avsnitt 4.2.
- ♦ Bestäm om branden ska modelleras med en konstant eller en tidsberoende effektutveckling.
- ♦ Ange var branden uppkommer:
  - Placering i höjddled: Brandens placering i höjddled anges från golvnivå. Avståndet från golv är betydelsefullt för objekt i plymen där det relativa avståndet från objektet till branden har stor påverkan på plymtemperaturen. Placeringen i höjddled är också viktig om brandgaslagrets höjd ska utvärderas. Höjden ovan golv kan påverka luftinblandningen i plymen och därmed också brandgaslagrets volym (höjd).
  - Placering nära vägg eller i hörn: En brand nära en vägg eller i en hörna får en plym med mindre luftinblandning än om den är fritt placerad. Temperaturen i plymen blir därmed högre.
- ♦ Bedöm brandens yta (ej nödvändigt för alla brandmodeller):
  - Cirkulär (t.ex. pölbränder med angiven diameter).
  - Rektangulär (t.ex. invallningsbrand, elskåp med viss längd och bredd).
- ♦ Ange ytterligare karakteristiska för branden:
  - Total (eller initial) vikt

- Sotproduktion. Sotproduktionen är betydelsefull när strålningsvärmen ska beräknas (t.ex. vid objekt i det övre brandgaslagret) samt vid beräkning av siktbarhet.
- Strålningsandel. Av den värme ett bränsle ger ifrån sig går en del till strålning och en del till konvektion. Om strålningsandelen väljs till ett konservativt värde innebär detta att den konvektiva delen blir mindre konservativ.

### 3.4.2 Objekt

Objekt (t.ex. kritisk utrustning) behöver ofta beskrivas med placering, skadekriterier och värmeledningsegenskaper.

Placeringen beskriver var objektet finns i relation till branden. Objekt kan påverkas direkt eller indirekt av branden. Direkt påverkan handlar ofta om placering rakt ovanför branden i flamman eller i plymen, medan indirekt påverkan handlar om en placering i t.ex. det övre brandgaslagret.

Skadekriterier beskriver vilka förhållanden som krävs för att objektet ska sluta fungera tillfredsställande (t.ex. vid påverkan av värme och rök). Kritiska värden för vart och ett av dessa förhållanden behöver tas fram, men det är också möjligt att låta det kritiska förhållande som inträffar först representera samtliga förhållanden som kan ge en kritisk påverkan.

Slutligen behövs kännedom om objektets värmeledningsegenskaper som densitet ( $\text{kg/m}^3$ ), värmekapacitet ( $\text{kW/m/K}$ ) och värmeledningskoefficient ( $\text{kg/kJ/K}$ ) för att kunna göra beräkningar av värmepåverkan. Om det är svårt att finna dessa egenskaper kan skadan bedömas enbart utifrån exempelvis brandgastemperatur eller infallande strålning. Denna bedömning blir konservativ avseende både temperatur och tidpunkt, då objektets värmetröghet kan fördröja temperaturökningen inuti objektet.

Objekt kan också utgöras av personer (t.ex. i ett kontrollrum). I dessa fall krävs en annan form av skadekriterier vilka ska väljas så att utrymning kan ske på ett säkert sätt. Temperatur, värmestrålning och siktbarhet är exempel på parametrar som kan behöva utvärderas. Det är också möjligt att låta det mest känsliga gränsvärdet representera samtliga förhållanden som kan ge en kritisk påverkan.

### 3.4.3 Annat brännbart material

Tändkällan anger specifikationerna för den initiala branden, vilken troligen kommer att spridas till annat brännbart material om detta är placerat tillräckligt nära branden. En snabb bedömning av risken för brandspridning kan göras med hjälp av korrelationer presenterade av Babrauskas (1982). Babrauskas redovisar nedanstående ekvation för att beräkna den brandeffekt som ger  $10 \text{ kW/m}^2$  på ett visst avstånd.

$$\text{Effekt} = 30,0 \cdot 10^{\left(\frac{\text{Avstånd} + 0,08}{0,89}\right)}$$

Det rekommenderas att användaren specificerar om och när brandspridning sker och hur detta påverkar både brandens placering och dess totala effektutveckling. Eventuella submodeller som ingår i tillämpbara brandmodeller bör inte användas då osäkerheterna relaterade till dessa submodeller är alldeles för svåra att hantera.

### 3.4.4 Rumsgeometri: Endast ett rum

Rumsgeometrin beskrivs av utrymmets längd, bredd och höjd. Rummets storlek har en stor betydelse för flertalet brandfysikaliska effekter då volymen utgör en betydelsefull del av de ekvationer som bygger upp brandmodellerna. Enklare brandmodeller som handberäkningsuttryck och zonmodeller kan inte ta hänsyn till inredning i rummen och kräver endast information om längd, bredd och höjd. Fältmodeller kan hantera betydligt mer information än så och varje konstruktionselement som har betydelse för strömningen bör anges.



### 3.4.5 Rumsgeometri: Flera rum, horisontellt eller vertikalt förbundna

Om scenariot omfattar flera rum vilka är horisontellt eller vertikalt förbundna via dörrar, fönster eller andra öppningar är det viktigt att känna till storleken på dessa öppningar samt avgöra huruvida de är öppna eller stängda. Varje rum beskrivs med sin längd, bredd och höjd. Rummets storlek har en stor betydelse för flertalet brandfysikaliska effekter då volymen utgör en betydelsefull del av de ekvationer som bygger upp brandmodellerna. Enklare brandmodeller som handberäkningsuttryck och zonmodeller kan inte ta hänsyn till inredning i rummen och kräver endast information om längd, bredd och höjd. Fältmodeller kan hantera betydligt mer information än så och varje konstruktionselement som har betydelse för strömningen bör anges.

### 3.4.6 Rumsgeometri: Komplicerad

De flesta rumsgeometrier som avviker från ett utseende liknande ett rätblock är att beakta som komplicerade i samband med brandanalys. I en zonmodell finns ingen möjlighet att hantera slutande tak eller sneda väggar, vilket med en särskild teknik är möjligt att göra i en fältmodell som FDS. En komplicerad geometri kan förenklas och när så sker är det viktigt att rummets volym och höjd bibehålls. Detta uppnås om både golvarean och rummets omkrets är densamma i modellen som i det aktuella rummet. Följande ekvationer kan användas för att bestämma likvärdig bredd och längd vid anpassning av en icke-rektangulär form till ett rätblock:

$$Area = L \cdot B$$

$$Omkrets = 2L + 2B$$

Då både arean och omkretsen är känd kan längden L och bredden B beräknas. Dessa mått, tillsammans med takhöjden ett rätblock som motsvarar det aktuella rummets utförande.

### 3.4.7 Material i omslutande konstruktioner

Materialet i omslutande konstruktioner karakteriseras av sin värmeledningsegenskap i form av densitet ( $\text{kg/m}^3$ ), värmekapacitet ( $\text{kW/m/K}$ ) och värmeledningskoefficient ( $\text{kg/kJ/K}$ ). Vanligt förekommande material i kärnkraftverk är betong, gips och stål. Om en värmeledningsegenskap varierar med temperaturen ska hänsyn tas till detta i analysen.

### 3.4.8 Naturlig ventilation: Vertikala öppningar

Vertikala öppningar avser dörrar och fönster och ibland kan det finnas fler vertikala öppningar än vad en viss brandmodell kan hantera. Exempelvis kan den s.k. MQH-metoden, en empirisk korrelation för att beräkna temperaturen i det övre brandgaslagret, endast hantera en öppning. Om flera öppningar ska omvandlas till endast en är det viktigt att själva ventilationsfaktorn  $A_0\sqrt{H_0}$  är konstant. En metodik för att beräkna ventilationsfaktorn finns i (Karlsson & Quintiere, 2000).

### 3.4.9 Naturlig ventilation: Läckageytor

De flesta utrymmen i ett kärnkraftverk har normalt stängda dörrar, men de är inte fullständigt täta. Tryckökningen i ett brandrum blir därför ofta relativt liten då brandgaser läcker till omgivningen via otätheter i omslutande konstruktioner. Läckageytorna är viktiga att ange i rum med stängda dörrar och fönster och information om deras storlek finns i Klote & Milke (2002). I utrymmen med minst en öppen dörr eller fönster kan läckageytorna försummas då deras yta är liten i förhållande till de öppningar som finns.

### 3.4.10 Naturlig ventilation: Horisontella öppningar

Horisontella öppningar är lättare att hantera än vertikala eftersom tryckskillnaden över öppningen är konstant och endast beroende av den höjd där öppningen är placerad. För horisontella öppningar behövs inte ventilationsfaktorn beräknas, utan det är möjligt att direkt addera de enskilda öppningarnas areor med varandra.



### 3.4.11 Mekanisk ventilation

Med mekanisk ventilation avses fläktar som antingen ger till- eller frånluft. Mekanisk ventilation används ofta för att ventilerar bort brandgaser från ett utrymme för att på så sätt tryckavlastade det samt minska exponeringen för rök och värme. Mekanisk ventilation kan påverka strömningen vid en brand och bör alltid beaktas.

### 3.4.12 Detektoregenskaper

Värmedetektorer karakteriseras av sin aktiveringstemperatur och sin värmetröghet (RTI-värde), samt var de är placerade i förhållande till branden. Rökdetektorer modelleras ofta på samma sätt som värmedetektorer, fast med lägre aktiveringstemperatur och RTI-värde. Exempel på detektoregenskaper finns i FDS User's Guide McGrattan (2010).

## 3.5 Ventilationskontrollerade bränder

I avsnitt 3.3 konstateras att ventilationskontrollerade bränder är ett specialfall vid modellering av bränder. CFD-modeller anses vara de mest lämpliga verktygen för dessa bränder, samtidigt som förbränningsmodellerna är så pass förenklade att de inte anses vara helt tillförlitliga vid låg syretillgång. Förbränning sker genom ett hundratals steg, vilka alla är beroende av temperaturen. Kunskapen om förbränningsprocessen är begränsad och föremål för pågående forskningsinsatser. Förbränningsegenskaper, framförallt produktion av giftiga brandgaser och sot har betydelse för bedömningen av brandens allvarlighet. Sotbildning påverkar inte enbart siktförhållandena i rummet utan också temperaturen i brandgaserna samt strålningsnivåer. Ett sätt att avgöra om en brand är väl- eller underventilerad är att studera den s.k. ekvivalenskvoten, vilken beräknas enligt nedan (Lazaro m.fl., 2008 ):

$$\Phi = \left( \frac{r_s}{Y_{O_2,air}} \right) \cdot \left( \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{air}} \right)$$

Där:

$r_s =$  är den stökiometriska kvoten mellan syre och bränsle.

$Y_{O_2,air} =$  är massfraktionen syrgas i luften ( $\approx 0.233$ ).

$\dot{m}_f =$  massflödet av bränsle, kg/s

$\dot{m}_{air} =$  tilluft, via öppningar eller ventilationssystemet, kg/s.

$\dot{m}_f$  och  $\dot{m}_{air}$  kan lätt erhållas från CFD-beräkningen eller från överslagsberäkningar med kännedom om öppningsförhållandena. För välventilerade förhållanden är  $\Phi \leq 1,0$  och för en underventilerad brand är  $\Phi > 1,0$ . Förbränningen övergår från flambrand till glödbrand då  $\Phi > 3,5$ . I intervallet  $1,0 \geq \Phi \geq 3,5$  är branden i en övergångsfas.

Nedanstående uttryck (Tewarson, 1995) kan användas för att beräkna hur förbränningseffektiviteten ändras som en funktion av ekvivalenskvoten, se även figur 8.

$$\chi_{vc} = \chi_{vv} \left[ 1 - \frac{1,0}{\exp(2,5\Phi^{-1,2})} \right]$$

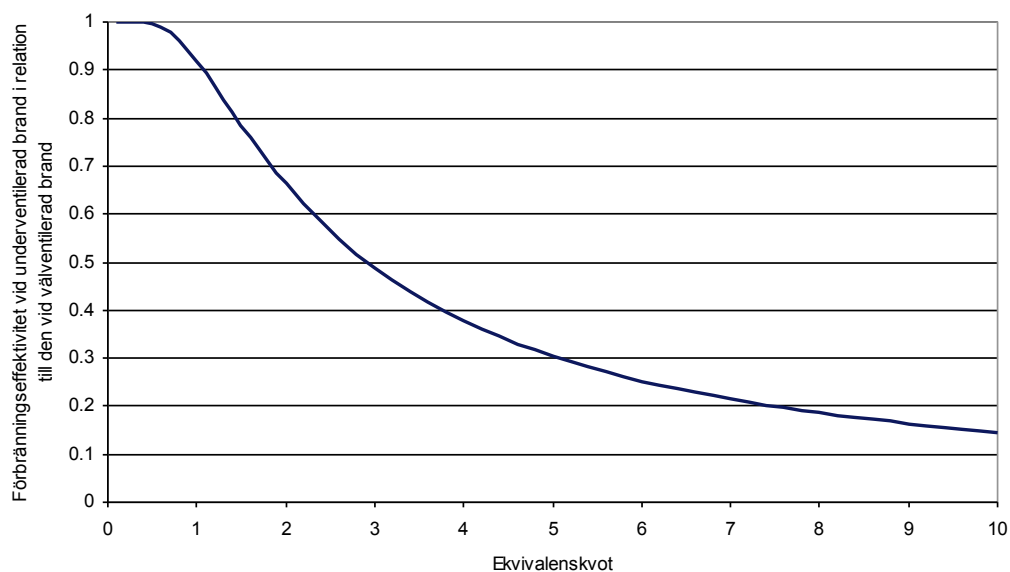
Där:

$\chi_{vc}$  Förbränningseffektivitet vid ventilationskontrollerade förhållanden.

$\chi_{vv} =$  Förbränningseffektivitet vid välventilerade förhållanden.

$\Phi =$  Ekvivalenskvot.

När förbränningseffektiviteten understiger c:a 0,4 slocknar flammen, vilket motsvarar en ekvivalenskvot på c:a 3,5.



**Figur 8 Förbränningseffektivitet som en funktion av ekvivalenskvoten.**

Efter hand som ekvivalenskvoten ökar, dvs. tillgången på syre för fullständig förbränning minskar, ökar också produktionen av sot och brandgaser. Tewarson (2008) ger följande samband för att beräkna produktionen av förbränningsprodukter som en funktion av ekvivalenskvoten och i tabell 6 redovisas värden på ingående variabler.

$$\frac{(y_{CO,s})_{vc}}{(y_{CO,s})_{wv}} = 1 + \frac{\alpha}{\exp(2,5\Phi^{-\xi})}$$

Där

$(y_{CO,s})_{vc}$  = produktion av CO (eller sot) vid ventilationskontroll, g/g.

$(y_{CO,s})_{wv}$  = produktion av CO (eller sot) vid välventilerade förhållanden, g/g.

$\Phi$  = ekvivalenskvot.

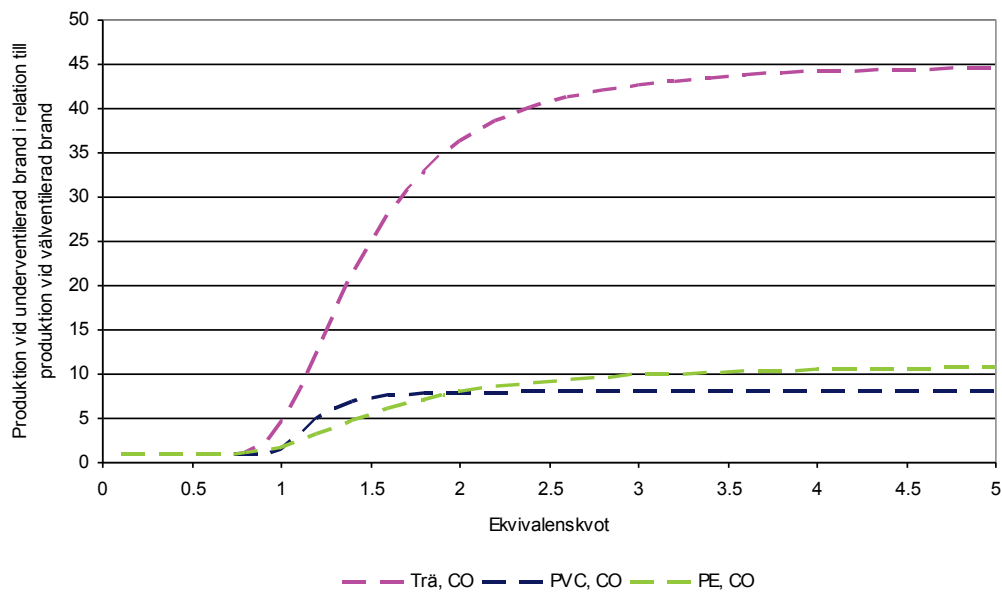
$\alpha, \xi$  = konstanter (se tabell 6).

**Tabell 6 Konstanter för bestämning av förbränningsegenskaper för olika material (Tewarson, 2008).**

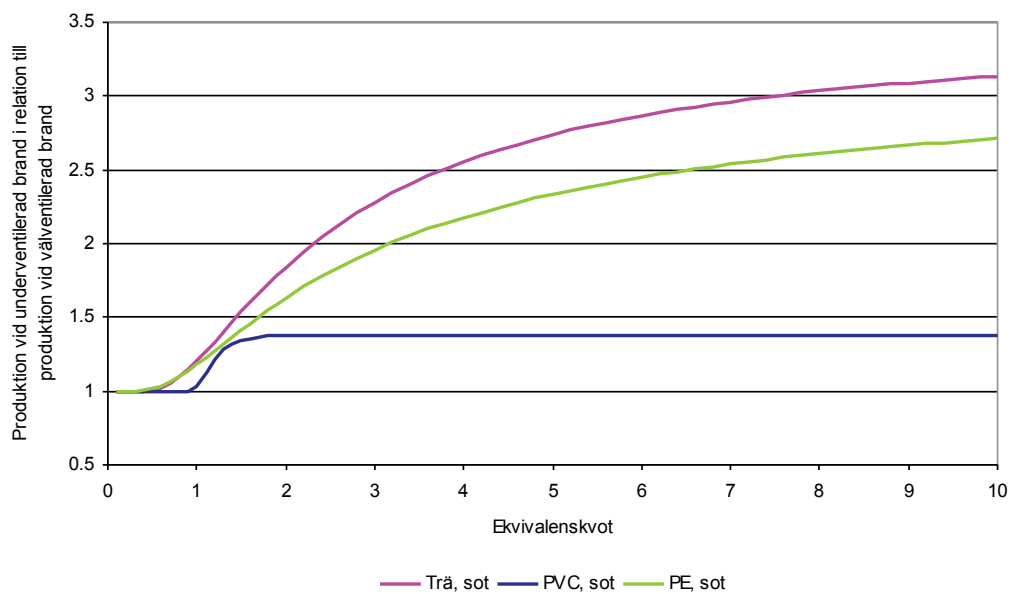
| Material | Kolmonoxid |       | Sot      |       |
|----------|------------|-------|----------|-------|
|          | $\alpha$   | $\xi$ | $\alpha$ | $\xi$ |
| PVC      | 7          | 8,0   | 0,38     | 8     |
| PE / XPE | 10         | 2,8   | 2,2      | 1,0   |
| Trä      | 44         | 3,5   | 2,5      | 1,2   |

I figur 9 och figur 10 illustreras hur produktionen av kolmonoxid och sot påverkas av ekvivalenskvoten. Figurerna visar att produktionen av kolmonoxid påverkas mer av bristen på

syre. För trä ökar produktionen c:a 45 gånger, medan den för plastmaterialen ökar c:a 10 gånger. När det gäller sotbildningen så ökar den i storleksordningen 1,5 till 3 gånger.

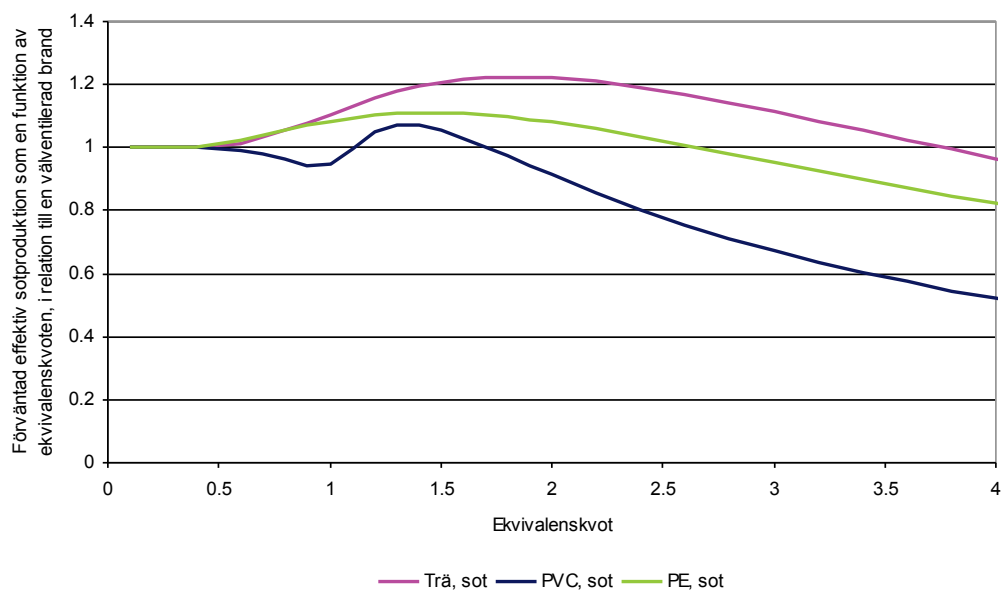


**Figur 9** Ekvivalenskvotens inverkan på produktionen av kolmonoxid (CO). Branden är underventilerad då ekvivalenskvoten överstiger 1,0.

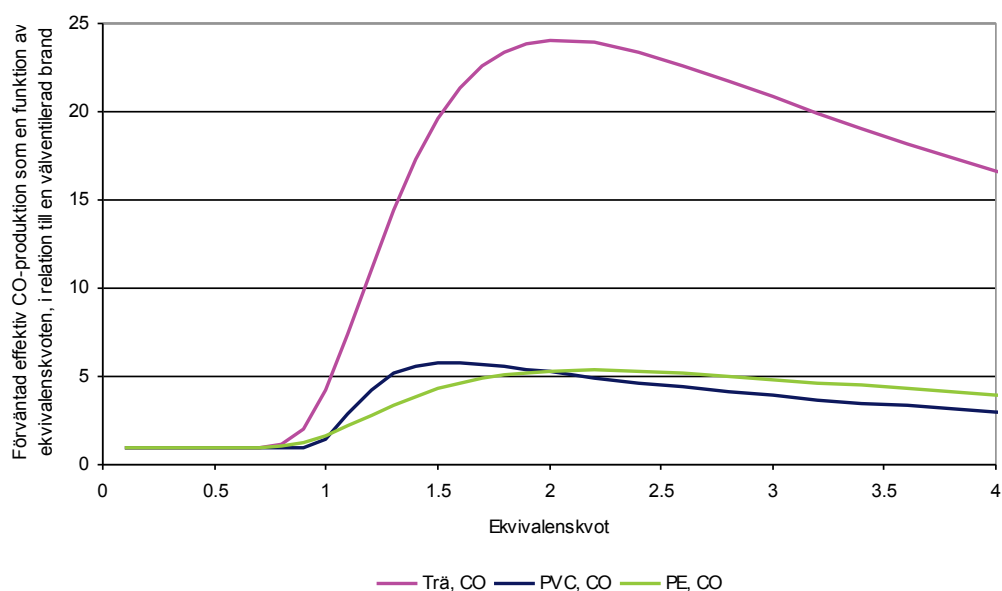


**Figur 10** Ekvivalenskvotens inverkan på produktionen av sot. Branden är underventilerad då ekvivalenskvoten överstiger 1,0.

Produktionen av brandgaser och sot ges som en funktion av massavbrinningen, vilken i sin tur minskar med ökande ekvivalenskvot. Om information i figur 8 kombineras med den i figur 9 och figur 10 fås följande resultat, figur 11.



**Figur 11** Effektiv sotproduktion som en funktion av ekvivalenskvoten.



**Figur 12** Effektiv CO-produktion som en funktion av ekvivalenskvoten.

Figur 11 och figur 12 visar att den ökade produktionen av sot till viss del kompenseras av minskad förbränning. Därmed är det möjligt att göra en förenklad bedömning av den ventilationskontrollerade branden med nedanstående metodik.

- ♦ Fastställ om den dimensionerande branden förväntas bli ventilationskontrollerad. Nedanstående beskrivning gäller endast för de fall då branden är ventilationskontrollerad. Branden blir ventilationskontrollerad om den dimensionerande maximala effektutvecklingen är större än den effektutveckling som är möjlig i rummet med kännedom om aktuella ventilationsförhållanden.
- ♦ Skapa en dimensionerande brand som tillväxer till maximal effekt vid ventilationskontroll och som sedan hålls konstant vid denna nivå till dess att bränslet börjar ta slut. Det är bränslets karakteristika som avgör hur branden tillväxer resp. avtar.

- ♦ Multiplicera produktionen av sot och CO för välventilerade bränder med nedanstående faktorer:
  - Träbaserade bränslen: CO = 25 och sot = 1,2.
  - Plastbaserade bränslen: CO = 5 och sot = 1,1.

I avsnitt 4.3.2 ges exempel på förbränningsegenskaper vid välventilerade förhållanden.

- ♦ Simulera brandförloppet i lämplig brandmodell. Simuleringen bör utföras med otätheter/öppningar som säkerställer att modellen inte får ett underskott av syre.



## 4 Indata till brandtekniska analyser

### 4.1 Exempel på skadekriterier

#### 4.1.1 Elektrisk utrustning

Appendix H i NUREG-6850 (2005) ger följande skadekriterier för kablar:

- ♦ Oklassade kablar (PE, PVC) anses vara skadade om innertemperaturen överstiger 205° C eller om den infallande värmestrålningen mot kablarna överstiger 6 kW/m<sup>2</sup>.
- ♦ Klassade kablar (XPE) anses vara skadade om innertemperaturen överstiger 330° C eller om den infallande värmestrålningen mot kablarna överstiger 11 kW/m<sup>2</sup>.

Elskåp, apparatskåp, motorer, ventiler, etc. anses vara skadade när temperaturen överstiger skadekriteriet för de kablar som finns i utrustningen. I andra fall rekommenderas en kritisk temperatur på 65° C och en maximal strålning på 3 kW/m<sup>2</sup>. Mer detaljerad information finns i NUREG-6850 (2005).

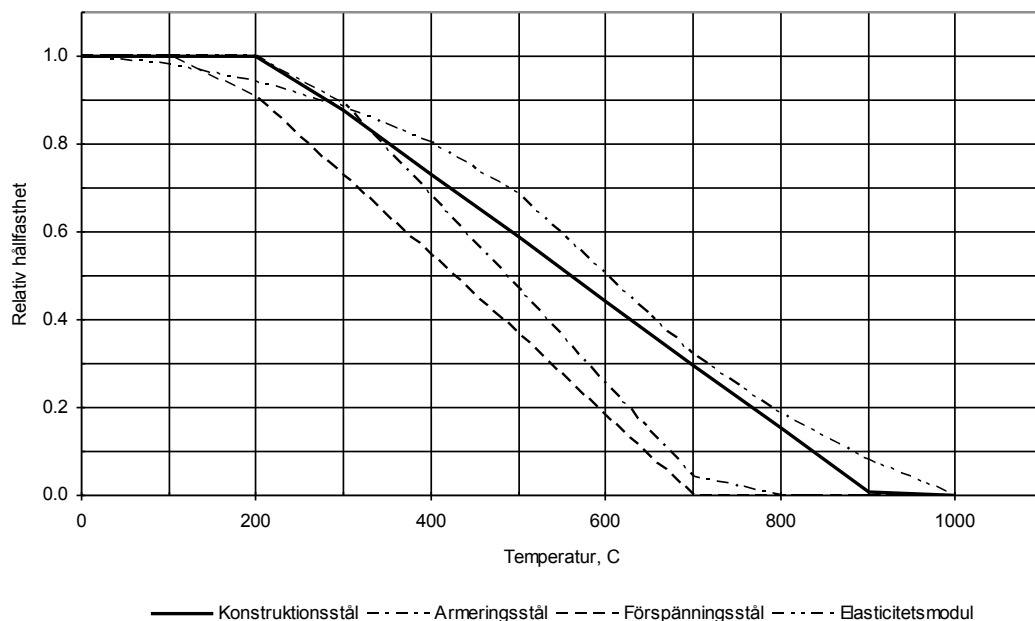
#### 4.1.2 Byggnadsdelar

##### ***Brandcellsavskiljande byggnadsdelar***

Skadekriterier för byggnadsdelar beror i stort på vilken funktion som ska upprätthållas. Boverkets byggreglers (BBR, 2008) definition på brandcellsavskiljande funktion anger att byggnadsdelar skall vara täta mot genomsläpp av flammor och gaser och så värmeisolerande att temperaturen på den av brandpåverkade sidan inte medför risk för antändning och brandspridning. Gränsvärdet för kritisk påverkan vid brand för att undvika brandspridning till angränsande brandcell är en genomsnittlig temperaturökning på högst 140° C på konstruktionens icke brandpåverkade sida. Ovanstående värden gäller för en påverkan enligt avsnitt 4.2 i SS-EN 13501-2 (standardbrandkurvan). Vid dimensionering baserad på modell av naturligt brandförlopp tillåts en genomsnittlig temperaturökning på högst 180° C.

##### ***Stålkonstruktioner***

För stålkonstruktioner handlar skadekriteriet om att konstruktionens bärförmåga ska bibehållas, vilket säkerställs genom att konstruktionsstålet inte utsätts för en temperatur som överstiger ett kritiskt värde. Denna kritiska temperatur beror i huvudsak på stålets lastutnyttjande grad och i figur 13 visas hur stor relativ hållfasthet som stålet har efter hand som temperaturen ökar.



**Figur 13 Minskning av stålets bärförmåga vid olika temperaturer (Buchanan, 2002).**

Figur 13 är plottade utifrån ekvationer redovisade av Buchanan (2002). Med hjälp av dessa ekvationer kan den relativa hållfastheten  $k_{y,T}$  (i förhållande till hållfastheten vid 20° C) för stålet beräknas som en funktion av temperaturen  $T$  med hjälp av nedanstående ekvation (gäller för konstruktionsstål):

$$k_{y,T} = (905 - T) / 690$$

$$T_{lim} = 905 - 690r_{load}$$

Den kritiska ståltemperaturen  $T_{lim}$  väljs konservativt och i analysen antas en relativt hög lastutnyttjandegrad ( $r_{load}$ ) på 66 %, vilket ger en kritisk ståltemperatur på 450° C. Erfarenhetsmässigt ligger lastutnyttjandegraden på de mest belastade elementen i ett fackverk som mest på 65 %.

### **Betongkonstruktioner**

För betongkonstruktioner används den s.k. 500° C-isotermen för att beräkna hur betongkonstruktionens bärförmåga minskar vid brandpåverkan (Anderberg & Pettersson, 1992). Om det resterande tvärsnittet, vanligen det som ligger innanför 500° C-isotermen, fortfarande har tillräcklig bärförmåga så anses konstruktionen bibehålla sin funktion.

#### **4.1.3 Personer**

Det finns olika typer av skadekriterier för personer. I tabell 7 redovisas nivåer för kritisk påverkan vid brand när utrymningssäkerheten ska verifieras i enlighet med Boverkets byggregler (BBR, 2008). Nivåerna är satta så att om en person utsätts för den angivna exponeringen är det stor sannolikhet att personen klarar sig utan alltför stort obehag.



**Tabell 7 Nivå för kritisk påverkan vid analys av utrymningssäkerhet (BBR, 2008).**

| Kriterium                      | Nivå                                                                                  |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Brandgaslagrets nivå ovan golv | Lägst 1,6+0,1 × rumshöjden                                                            |
| Siktbarhet, 2 m ovan golv      | 10 m i okänd miljö<br>5 m i känd miljö                                                |
| Värmedos                       | max 60 kJ/m <sup>2</sup> utöver energin från en strålningsnivå på 1 kW/m <sup>2</sup> |
| Temperatur                     | max 80° C                                                                             |
| Värmestrålning                 | max 2,5 kW/m <sup>2</sup>                                                             |

BBR anger inte kriterier för toxicitet, utan sådana går att finna i NKB (1994) för det anges att kolmonoxidkoncentration (CO) bör understiga 2 000 ppm och koldioxidkoncentration (CO<sub>2</sub>) bör understiga 5 %. Vidare bör syrgashalten (O<sub>2</sub>) inte vara lägre än 15 %.

Kriterierna i BBR bygger på att man vill undvika att exponera personer för brandens effekter och att hänsyn tas till känsliga personers förmåga att klara en sådan exponering. Ibland kan det vara ofrånkomligt att personal i exempelvis kontrollrummet exponeras för brandgaser och värme i större utsträckning än vad gränsvärdena i tabell 7 anger. NUREG-6850 (2005) anger att temperaturen bör understiga 95° C, strålningen vara mindre än 1 kW/m<sup>2</sup> och siktbarheten minst 3 m. En siktbarhet på 3 m är den absolut lägsta nivå som kan tillåtas för att möjliggöra utrymning. Om sikten understiger denna nivå visar forskning att personer hellre vänder om än fortsätter i den avseende utrymningsriktningen (Bryan, 2008).

En mer nyanserad modell för att bedöma effekten av brandgaser på personer är en s.k. fraktionsdosmodell (Fractional Effective Dose – FED). En sådan modell beskriver den sammanlagda effekten av de giftiga gaserna koloxid (CO), koldioxid (CO<sub>2</sub>) och vätecyanid (HCN) samt effekten av en minskad syrekoncentration (O<sub>2</sub>). Modellen anger bidraget till den dos som människan kan tåla för respektive gas vid en given koncentration och exponeringstid. Modellen är förknippade med flera osäkerheter och bör användas konservativt. En förenklad modell för beräkning av FED-värdet redovisas nedan (Purser, 2008):

$$FED = F_{I_{CO}} \cdot V_{CO_2}$$

där:

$FED$  = total fraktionsdos i tidssteget för medvetlöshet

$F_{I_{CO}}$  = fraktionsdos för medvetlöshet för kolmonoxid

$V_{CO_2}$  = korrektionsfaktor för ökad andningsfrekvens orsakad av koldioxid

Fraktionsdosen för kolmonoxid kan beräknas enligt nedan.

$$F_{I_{CO}} = \frac{K(C_{CO,ppm})^{1,036} t}{D}$$

där:

$F_{I_{CO}}$  = fraktionsdos för medvetlöshet för kolmonoxid

$$K = 8,2925 \times 10^{-4}$$

$C_{CO}$ , ppm = koncentration av kolmonoxid (ppm)

$t$  = tid (min)

$D$  = koncentration karboxylhemoglobin (COHb) i blodet för medvetslöshet = 30 %.

Korrektionsfaktorn för ökad andningsfrekvens orsakad av koldioxid har beräknats enligt nedan.

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0,1903 \times C_{CO_2, \%} + 2,0004)}{7,1}$$

där:

$C_{CO_2, \%}$  = koncentration koldioxid i procent (%)

Ett försök till generalisering av FED-nivåer för att omfatta personer med olika känslighet visas i tabell 8. FED 1,0 motsvarar en CO<sub>Hb</sub> på 40 % och FED 2,0 förutsätts vara dödlig med CO<sub>Hb</sub> på 60 %.

**Tabell 8 Tolkning av olika FED-nivåer (Mowrer m.fl., 2002 och ISO/TS 13571:2002).**

| FED  | Effekt                                                     | Kommentar        |
|------|------------------------------------------------------------|------------------|
| 0,01 | Obetydlig (insignificant)                                  |                  |
| 0,1  | Lindriga skador (sub-incapacitating)                       |                  |
| 0,3  | Person kan ej av att utrymma på egen hand (incapacitating) | 10 % medvetslösa |
| 1,0  | Medvetslöshet till risk för död (sub-lethal)               | 50 % medvetslösa |
| 2,0  | Dödlig (lethal)                                            |                  |

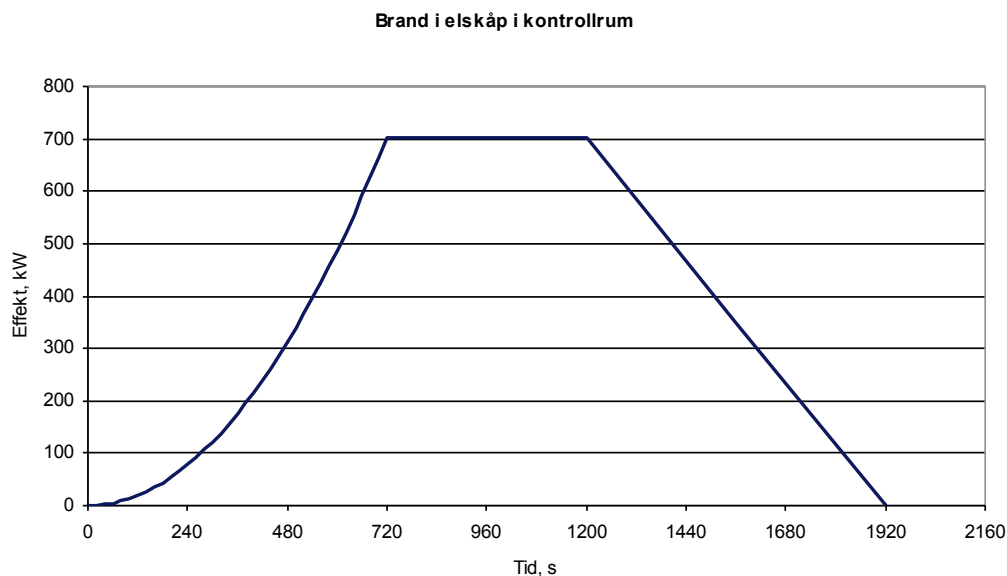
Mowrer m.fl. (2002) anger att ett FED-värde på 0,1 motsvarar en COHb på 3 %, vilket inte ger någon märkbar påverkan. ISO/TS 13571 (2002) rekommenderar ett gränsvärde på FED = 0,3 för att kunna utrymma tryggt.

## 4.2 Exempel på brandförlopp

Detta avsnitt ger exempel på brandeffekter för några olika situationer och där bränderna sker under sk fribrinnande förutsättningar. Någon inverkan på brandförloppen pga omgivande lokalers förutsättning eller spridning mellan olika föremål ingår inte utan måste särskilt beaktas. Brandeffektkurvorna antas inte heller beakta skedet efter en eventuell övertändning.

### 4.2.1 Brand i elskåp i kontrollrum

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på effektutveckling vid brand i ett elskåp i ett kontrollrum. Elskåpet antas vara matat med lågspänning och branden sprider sig till mer än en bunt av klassade kablar. Branden börjar pga. ett elfel och brandtillväxten följer en kvadratisk kurva ( $t^2$ ) till ett värde på 702 kW efter 12 min. Efter 20 min avtar effektutvecklingen linjärt för att nå 0 kW på en tid av 12 min. Brandens maximala effekt blir således 702 kW och dess totala varaktighet är 32 min. Effektutvecklingen visas i figur 14.

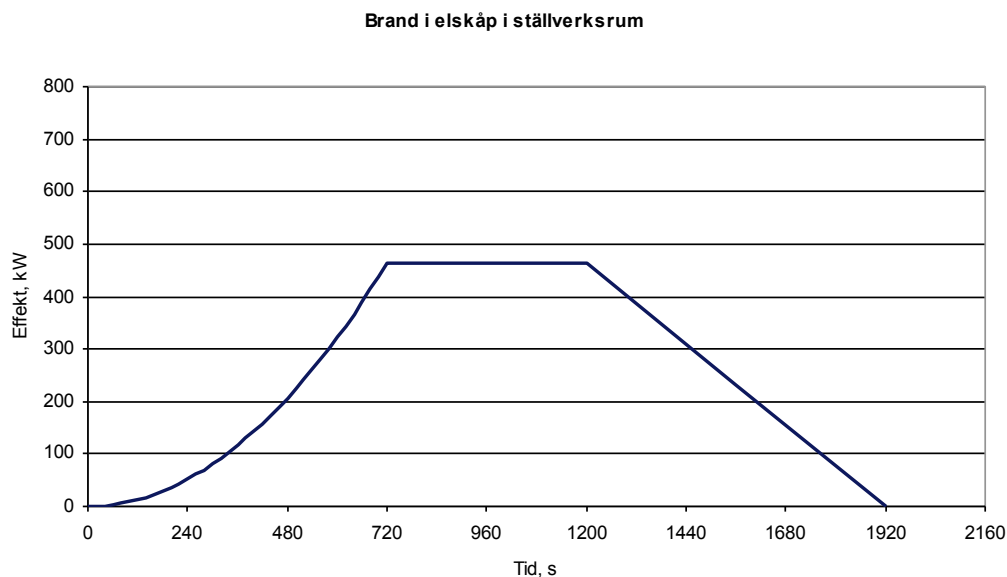


**Figur 14** Effektutveckling vid brand i elskåp i kontrollrum.

För ytterligare detaljer avseende brandförloppet hänvisas till NUREG-6850 (2005), sidan G-5.

#### 4.2.2 Brand i elskåp i ställverksrum

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på effektutveckling vid brand i ett elskåp i ett ställverksrum. Elskåpet antas vara slutet branden sprider sig till mer än en bunt av oklassade kablar. Branden börjar pga. ett elfel och brandtillväxten följer en kvadratisk kurva ( $t^2$ ) till ett värde på 464 kW efter 12 min. Efter 20 min avtar effektutvecklingen linjärt för att nå 0 kW på en tid av 12 min. Brandens maximala effekt blir således 464 kW och dess totala varaktighet är 32 min. Effektutvecklingen visas i figur 15.



**Figur 15** Effektutveckling vid brand i elskåp i ställverksrum.

För ytterligare detaljer avseende brandförloppet hänvisas till NUREG-6850 (2005), sidan G-5.

#### 4.2.3 Brand i smörjolja i pumprum

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på effektutveckling vid brand i smörjolja i ett pumprum. I rummet finns 190 l olja, vilken läcker ut i en invallning med en yta på 2,75 m<sup>2</sup>. Nedanstående ekvationer används för att beräknas effektutvecklingen:

$$Q = \Delta H_c \cdot \dot{m}'' \cdot A$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' \cdot \left(1 - e^{-k\beta D_{eff}}\right)$$

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Där

$Q =$  Brandens effektutveckling, kW.

$\Delta H_c =$  Förbränningsvärme, kJ/kg.

$\dot{m}'' =$  Massavbrinningshastighet, kg/m<sup>2</sup>/s.

$A =$  Brandens area, m<sup>2</sup>.

$\dot{m}_{\infty}'', k\beta =$  Vätskespecifika variabler, kg/m<sup>2</sup>/s resp. dimensionslös.

$D_{eff} =$  Brandens effektiva diameter, m.

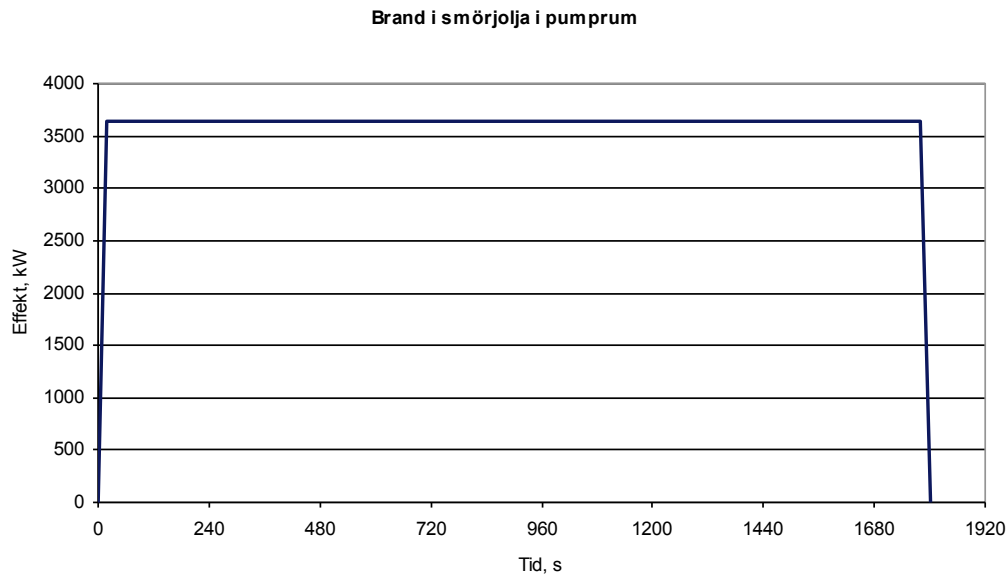
Oljan har ett  $\dot{m}_{\infty}''$  på 0,039 kg/m<sup>2</sup>/s och  $k\beta$  på 0,7. Oljans förbränningsvärme är 46 400 kJ/kg och dess densitet är 760 kg/m<sup>3</sup>. Den maximala effektutvecklingen beräknas enligt nedan:

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,75}{\pi}} = 1,87 \text{ m}$$

$$\dot{m}'' = 0,039 \cdot \left(1 - e^{-0,7 \cdot 1,87}\right) = 0,028 \text{ kg/m}^2/\text{s}$$

$$Q = 46\,400 \cdot 0,028 \cdot 2,75 = 3\,633 \text{ kW}$$

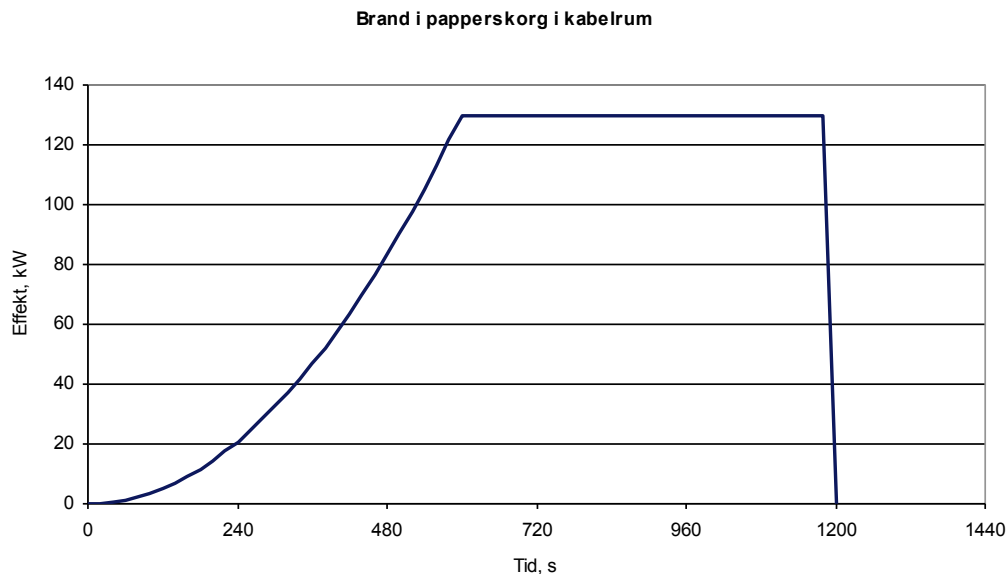
Brandens totala massflöde är 0,028 x 2,75 = 0,08 kg/s, vilket gör att det tar c:a 30 min för oljan att brinna upp. Effektutvecklingen visas i figur 16. För ytterligare information om beräkning av brandförlopp i vätskor hänvisas till Karlsson & Quintiere (2000) och Babrauskas (2008).



**Figur 16** Effektutveckling vid brand i smörjolja i ett pumprum.

#### 4.2.4 Brand i papperskorg i kabelrum

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på effektutveckling vid brand i en papperskorg placerad i ett kabelrum. Papperskorgen har en höjd på 0,8 m och en diameter på 0,6 m. Papperskorgen innehåller 5 kg skräp med ett genomsnittligt förbränningsvärme på 20 kJ/g. Brandtillväxten följer en kvadratisk kurva ( $t^2$ ) och når ett värde på 130 kW efter 10 min. Det tar c:a 20 min för skräpet att brinna upp. Effektutvecklingen visas i figur 17.



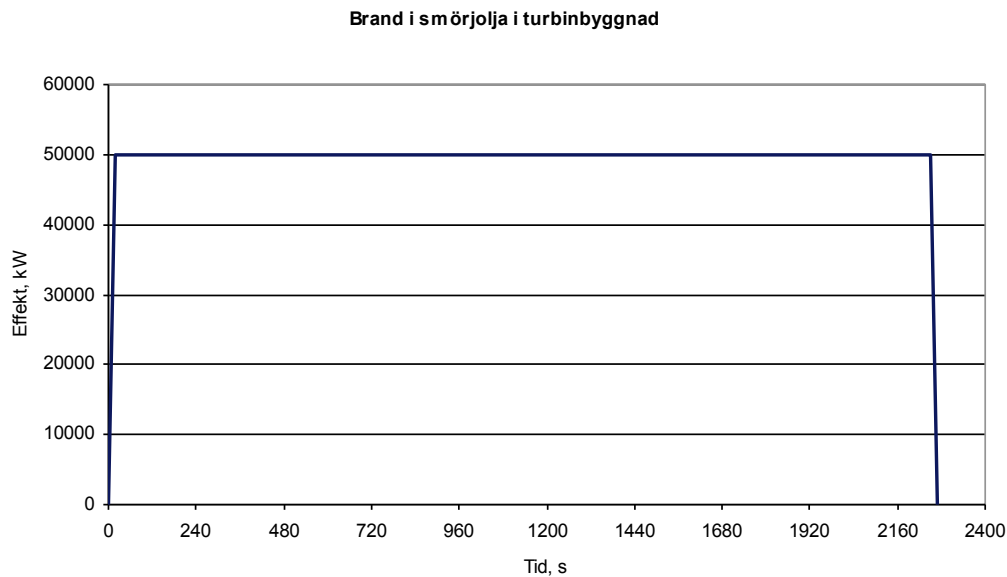
**Figur 17** Effektutveckling vid brand i en papperskorg i ett kabelrum.

För ytterligare information om brandförloppet vid papperskorgsbränder hänvisas till bl.a. Karlsson & Quintiere (2000).

#### 4.2.5 Brand i smörjolja i turbinbyggnaden

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på effektutveckling vid brand i smörjolja i turbinbyggnaden. Exemplet bygger på samma metodik som exemplet i avsnitt 4.2.3, undantaget att det i det här exemplet är totalt 3 000 l olja som läcker ut. Oljan har samma egenskaper som i det tidigare exemplet och invallningen har en yta på 28 m<sup>2</sup>. Brandens totala effektutveckling

uppgår till 50 MW och dess varaktighet beräknas till c:a 38 min. Effektutvecklingen visas i figur 18.

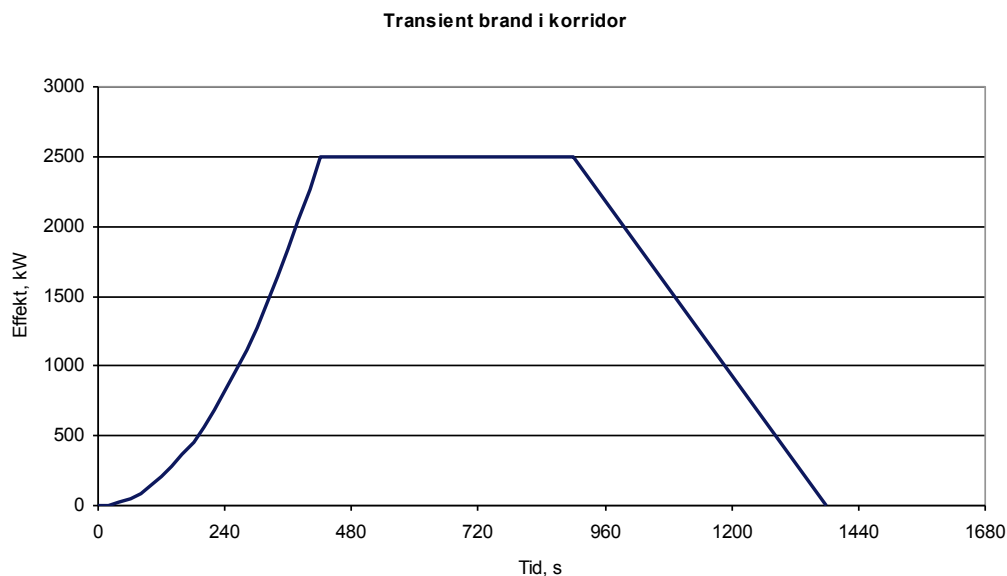


**Figur 18** Effektutveckling vid brand i smörjolja i turbinbyggnaden.

För ytterligare information om beräkning av brandförlopp i vätskor hänvisas till Karlsson & Quintiere (2000).

#### 4.2.6 Transient brand i korridor

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på en effektutveckling för en transient brand i en korridor. Branden uppkommer i några lastpallar (4 st) och två soptunnor. Effektutvecklingen bedöms genom att addera effektutvecklingen för lastpallarna med effektutvecklingen för soptunnorna. Brandtillväxten följer en kvadratisk kurva ( $t^2$ ) till ett maximalt värde på 2 500 kW efter 7 min. Efter 15 min avtar effektutvecklingen linjärt för att nå 0 kW på en tid av 8 min. Brandens maximala effekt blir således 2 500 kW och dess totala varaktighet är 23 min. Effektutvecklingen visas i figur 19.

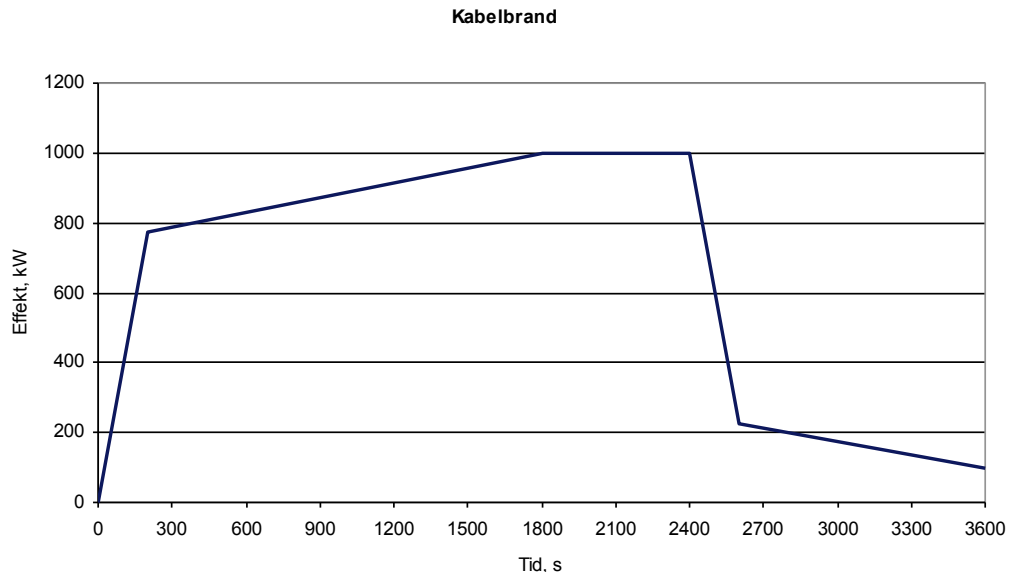


**Figur 19** Effektutveckling vid en transient brand i en korridor.

För ytterligare information hänvisas till Karlsson & Quintiere (2000).

#### 4.2.7 Kabelbrand

NUREG-1934 (2010) ger följande exempel på en effektutveckling för en brand i kablar placerade på en kabelstege. Kablarna är isolerade med PE och det finns i storleksordningen 120 kablar per kabelstege. Varje kabel väger 0,4 kg/m och andelen plast är 0,33. Branden uppkommer i en böj, nära väggen. Förbränningsvärmen är 24 kJ/g och uppskattad effektutveckling är 265 kW/m<sup>2</sup>. För att kunna beräkna effektutvecklingen vid en kabelbrand behöver både spridningshastigheten och brandvaraktigheten vara kända. Spridningshastigheten i vertikalled antas vara 25 mm/s och i horisontalled 0,9 mm/s. Men en vertikal yta på knappt 4 m<sup>2</sup> blir den maximala effektutvecklingen c:a 1 000 kW. Varaktigheten för maximal effekt bedöms till drygt 40 min och effektutvecklingen visas i figur 20



**Figur 20** Effektutveckling vid kabelbrand.

För ytterligare detaljer avseende brandförloppet hänvisas till NUREG-6850 (2005).

## 4.3 Materialegenskaper

### 4.3.1 Värmeledningsegenskaper

I tabell 9 redovisas värmeledningsegenskaper för olika material<sup>7</sup>.

**Tabell 9 Värmeledningsegenskaper för olika material.**

| Material     | Värmeledningskoefficient, W/m/K | Densitet, kg/m <sup>3</sup> | Värmekapacitet, kJ/kg/K | Referens   |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------|
| Betong       | 1,6                             | 2 400                       | 0,75                    | NUREG-1805 |
| Gipsskiva    | 0,17                            | 960                         | 1,1                     | NUREG-1805 |
| Stål         | 54                              | 7 850                       | 0,465                   | NUREG-1805 |
| Plywood      | 0,12                            | 540                         | 2,5                     | NUREG-1805 |
| PVC/PE kabel | 0,192                           | 1 380                       | 1,29                    | NUREG-6850 |
| XPE kabel    | 0,235                           | 1 375                       | 1,39                    | NUREG-6850 |

### 4.3.2 Förbränningsegenskaper

Förbränningsegenskaper, framförallt produktion av giftiga brandgaser och sot har betydelse för bedömningen av brandens allvarlighet. Sotbildning påverkar inte enbart siktförhållandena i rummet utan också temperaturen i brandgaserna samt strålningsnivåer. Data från Tewarson (2008) visar att brännbara material har en sotproduktion på 0,01 till 0,2 g/g brunnet material. Sotproduktionen beror således av bränslets karakteristiska, men också på ventilationsförhållanden i rummet. I tabell 10 redovisas förbränningsegenskaper för några olika material vid välventilerade förhållanden.

**Tabell 10 Förbränningsegenskaper för olika material (Tewarson, 2008).**

| Material     | Förbränningsvärme, kJ/g | Sotproduktion, g/g | CO-produktion, g/g | Stökiometrisk kvot (syre/bränsle) |
|--------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| PVC/PE kabel | 24,0                    | 0,10               |                    | 1,408                             |
| XPE kabel    | 10,3                    | 0,10               |                    | 3,425                             |
| Papper/trä   | 16,4                    | 0,015              |                    | 1,664                             |

För underventilerade förhållandena är det nödvändigt att justera produktionen av sot och kolmonoxid, vilket bör ske enligt vägledningen i avsnitt 3.5.

---

<sup>7</sup> Notera att värmeledningskoefficienten hos ett material kan ha ett temperaturberoende som är nödvändigt att beakta, se 5.5.5 för mer information.



## 5 Specifikt om Fire Dynamics Simulator (FDS)

Detta kapitel beskriver fältmodellen Fire Dynamics Simulator med fokus på modellens uppbyggnad, användningsområden, begränsningar och hur modellen validerats. Kapitlet redovisar också specifika tekniker för att kunna kvalitetssäkra beräkningarna. För att underlätta kontroll vid användning av FDS redovisas en checklista över de allra viktigaste kontrollpunkterna, före och efter en simulering.

FDS är programmet som utför själva beräkningarna. För att kunna hantera all utdata på ett rationellt sätt används programmet Smokeview för att grafiskt åskådliggöra resultaten från FDS. Smokeview utvecklas också av NIST och är därför anpassat till utdataformatet från bla FDS.

### 5.1 Versionshistorik

Den första versionen av FDS gjordes publicerades i januari 2000 och sedan dess har programmet genomgått flera revisioner och uppgraderingar. I oktober 2007 publicerades FDS 5, vilket var den hitintills största omarbetningen av programmet som genomförts. I tabell 11 redovisas en kortfattad revisionshistorik.

**Tabell 11 Revisionshistorik för Fire Dynamics Simulator.**

| Version                |   | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FDS<br>(januari 2000)  | 1 | Den första versionen av en ny CFD-kod som behandlar branddriven flödesdynamik. Programmet bygger på en numerisk lösning av Navier-Stokes ekvationer för flöde med låg hastighet, drivet av temperaturskillnader. Fokus ligger på transport av värme och brandgaser i samband med bränder.                                                                                      |
| FDS<br>(november 2001) | 2 | FDS användes till lika delar för att dimensionera brandgasventilation och studera aktiveringstider samt för brandsaksutredningar. FDS 1 fokuserade på transport av värme och brandgaser och för att förbättra modellen med avseende på rekonstruktioner av inträffade bränder var det nödvändigt att förbättra förbrännings- och strålningsmodellerna, vilket gjordes i FDS 2. |
| FDS<br>(november 2002) | 3 | FDS 3 har samma principiella uppbyggnad som FDS 2. Förbränningsmodellen har dock gjorts mer tillförlitlig, vilket i sin tur även förbättrar strålningsmodellen och gör simuleringen mindre beroende av gridupplösningen.                                                                                                                                                       |
| FDS<br>(juli 2004)     | 4 | FDS 4 samma principiella uppbyggnad som FDS 3. I FDS 4 introducerades möjligheten att genomföra beräkningar med parallella processorer. En förkolningsmodell implementerades, men i övrigt gjordes inga större ändringar av koden.                                                                                                                                             |
| FDS<br>(oktober 2007)  | 5 | FDS 5 innebar flera stora ändringar av programkoden, framförallt avseende förbränningsmodellen. En samling av verifierings- och valideringsdokument publicerades som kan användas för kvalitetssäkring. Nu gällande version.                                                                                                                                                   |

### 5.2 Uppbyggnad och användningsområde

I avsnitt 2.3.3 redovisas detaljer om uppbyggnaden av FDS och i detta avsnitt återges några karakteristiska delar. FDS använder en flödesdynamisk modell uppbyggd av Navier-Stokes ekvationer för termisk driven strömning i låga hastigheter. Turbulensen orsakad av branden

simuleras med en teknik kallad LES – Large Eddy Simulation, vilken skiljer sig från RANS som flera andra fältmodeller använder. Förbränningsmodellen kallas ”mixture fraction” och kan endast hantera en typ av bränsle. Värmestålningsmodellen bygger på användning av ett förutbestämt antal diskreta strålar, vilka skickas ut symmetriskt i beräkningsdomänen och värmeledningsmodellen är endimensionell och uppbyggd av empiriska korrelationer. Värmetransport till mellan brandgaser och fasta objekt sker via strålning och konvektion.

Det huvudsakliga användningsområdet för FDS är att studera transport av värme och brandgaser i samband med brand. FDS kan koppla samman flera beräkningsdomäner och användas för att studera exempelvis aktiveringstid för olika typer av detektorer, tid för antändning av olika brännbara material, effektutvecklingen för pölbränder, brandspridning och brandtillväxt i fasta bränslen och släckeffekt orsakad av begränsad syretillgång, nedkylning av bränsle eller påföring av vatten. Dock kan detaljeringsgraden hos respektive submodell begränsa möjliga tillämpningar.

En indatafil till FDS utgörs av en textfil, med innehåll och struktur efter en viss mall. I filen inkluderas all den information som krävs för att köra modellen, vilket gör det lätt att flytta simuleringar, starta om dem samt genomföra kvalitetssäkring. I figur 21 visas ett exempel på en indatafil (McGrattan m.fl., 2010).

```
&HEAD CHID='WTC_05_v5', TITLE='WTC Phase 1, Test 5, FDS version 5' /
&MESH IJK=90,36,38, XB=-1.0,8.0,-1.8,1.8,0.0,3.82 /
&TIME T_END=5400. /
&MISC SURF_DEFAULT='MARINITE BOARD', TMPA=20., POROUS_FLOOR=.FALSE. /
&DUMP NFRAMES=1800, DT_HRR=10., DT_DEVC=10., DT_PROF=30. /

&REAC ID          = 'HEPTANE TO CO2'
      FYI          = 'Heptane, C_7 H_16'
      C            = 7.
      H            = 16.
      CO_YIELD     = 0.008 /
      SOOT_YIELD   = 0.015 /

&OBST XB= 3.5, 4.5,-1.0, 1.0, 0.0, 0.0, SURF_ID='STEEL FLANGE' / Fire Pan
...
&SURF ID          = 'STEEL FLANGE'
      COLOR        = 'BLACK'
      MATL_ID       = 'STEEL'
      BACKING       = 'EXPOSED'
      THICKNESS     = 0.0063 /
...
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
...
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
...
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
...
&DEVC XYZ=6.04,0.28,3.65, QUANTITY='oxygen', ID='EO2_FDS' /
...
&TAIL / End of file.
```

**Figur 21 Exempel på indatafil till FDS.**

Indatafilen består således av flertalet delar. Den första delen omfattar grundläggande förutsättningar (&HEAD, &MESH, &TIME, &MISC och &DUMP) och här anges betydelsefull information för simuleringens genomförande. Därefter kommer en del som behandlar själva förbränningsreaktionen (&REAC). Här anges bränslets karakteristika som kemisk struktur, sotproduktion, etc. Huvuddelen av indatafilen består av de ”block” som bygger upp rumskonfigurationen (&OBST). Varje objekt tilldelas även en egenskap, vilken definieras separat (&SURF ID och MATL\_ID).

En egenskap kan också ”målas” på en yta med ett speciellt kommando (&VENT). En s.k. vent måste alltid placeras på ett objekt och kan användas för att transportera bränsle och luft in eller ut ur beräkningsdomänen. Det finns även en speciell form av vent ('OPEN') som innebär att det finns en passiv öppning till det fria. Indatafilen avslutas med att användaren anger vilken typ av utdata som ska samlas in (&SLCF, &BNDF eller &DEVC). Om en viss utdataparameter inte har angetts i indatafilen finns den ej tillgänglig när simuleringen är slutförd.

### 5.3 Allmänna begränsningar

FDS har flera begränsningar vilka är nödvändiga att känna till när modellen används för brandtekniska analyser. En av de viktigaste är att modellen kräver att användaren har stor kunskap om modellen och branddynamik, då det är användaren som genom angivna indata i stort styr hur väl modellen kommer att prestera. Användaren måste framförallt ha kännedom om:

- ♦ Hur beräkningsdomänen ska byggas upp med fokus på gridupplösningen.
- ♦ Materialparametrar (och deras beroende av temperaturen)
- ♦ Omgivningsparametrar som t.ex. ventilationsöppningar.

Varken FDS eller Smokeview har någon funktion som meddelar om modellen levererar ett otillförlitligt resultat, utan dessa bedömningar görs av användaren. Det är lätt att vilseledas av fina bilder i Smokeview, men dessa måste kvalitetssäkras för att resultatet ska kunna användas i brandtekniska analyser. Vägledning för sådan kvalitetssäkring redovisas i avsnitt 5.5. Avsnitt 5.5 beskriver också några specifika begränsningar med FDS och hur dessa kan hanteras, medan begränsningar av mer allmän karaktär redovisas i detta avsnitt.

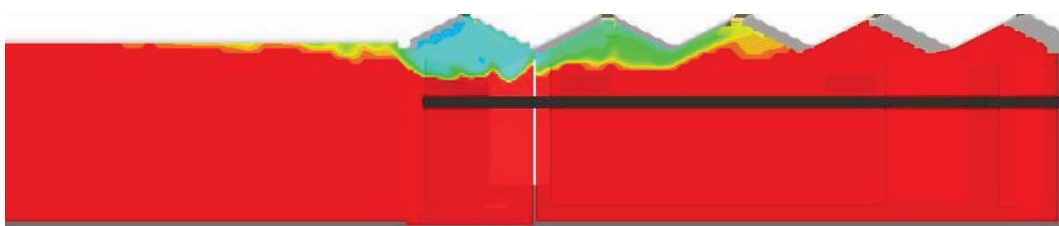
#### 5.3.1 Branden och dess effektutveckling

FDS ger otillförlitliga resultat på värmestrålning och temperaturökning i brandens närområde pga svårigheter att modellera själva flamman. Detta gör att modellen har svårt att bedöma spridning och tillväxt av bränder i fasta material. FDS behöver således en användarspecificerad brandutveckling (effektutveckling som en funktion av tiden) för att kunna leverera tillfredsställande resultat avseende transport av värme och brandgaser. Om den inbyggda modellen för att beräkna effektutvecklingen används (i motsats till att den specificeras av användaren), blir resultaten osäkra.

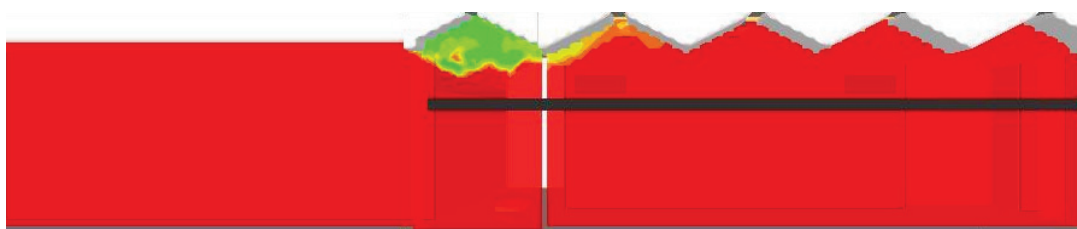
#### 5.3.2 Förbränningsmodellen

Förbränningsmodellen (mixture fraction) kan inte hantera släckeffekter i sig, utan måste förlita sig på submodeller som utgår från bl.a. temperaturen och syretillgången. Därmed har modellen också svårt att hantera underventilerade bränder, där bränslet är i överskott i förhållande till syretillgången. Vidare kan förbränningsmodellen endast hantera ett bränsle, samtidigt som det är svårt att finna indata till förbränningsreaktionen. I vissa fall kan det vara nödvändigt att skapa ett ”nytt” bränsle, vilket består av en blandning av olika material t.ex. plast och trä. Detta måste göras med omsorg då oönskade effekter kan uppkomma om exempelvis användaren utgår från förbränningsegenskaper hos trä och därefter förändrar sotproduktionen till att bli mer ”plastlik”. I figur 22 visas konsekvenserna av att ha ändrat sotproduktionen, utan att ändra andra bränslekaraktistika, vilket ger en för scenariot alldeles för omfattande produktion och utbredning av brandgaser.

Trä (PU sotproduktion)



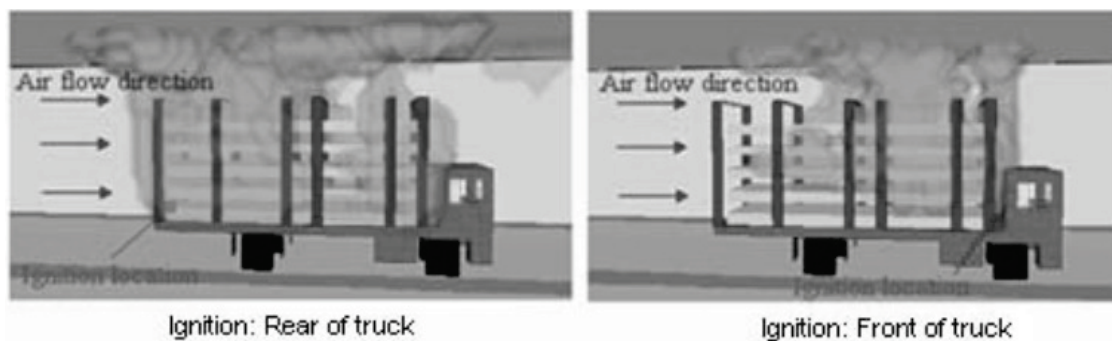
PU



**Figur 22** Den övre bilden visar utbredningen av brandgaser vid en tidpunkt i en byggnad där trä har använts som bränsle samtidigt som användaren har ändrat sotproduktionen till att motsvara polyuretan (PU). Den nedre bilden visar förhållandena vid samma tidpunkt då enbart PU används som bränsle.

Skillnaden i utbredning av brandgaser är stor mellan den övre och undre bilden i figur 22. Skillnaden uppkommer då trä har c:a dubbelt så stor massavbrinning som polyuretan vid samma effektutveckling, vilket följaktligen ger dubbelt så stor mängd sot. Användaren måste därför vara ytterst försiktig om parametrarna som ingår i förbränningsreaktionen ska ändras.

I figur 23 visas ett exempel på när FDS har använts för att bedöma hur en brand sprider sig i träpallar på en lastbil placerad i en tunnel. I exemplet kunde det konstateras att FDS visar stora skillnader mellan den effekt som mättes upp vid experiment och beräkningar av brandspridningsmodellen i FDS.



**Figur 23** Försök att återskapa en brand i träpallar på en lastbil med hjälp av FDS (Cheong m.fl., 2009). Observera att denna funktion är föremål för forskning och ej tillämpning.

Modellen för brandspridning anses av många vara föremål för forskning och inte tillämpning. Användaren bör därför själv specificeras effektutvecklingen och i sin beskrivning av de representativa brandscenarierna (se avsnitt 2.2.3). Den svårighet som FDS har i att beräkna brandens spridning gör också modellen mindre lämplig att använda vid brandutredning eller liknade försök att återskapa ett brandförlopp. När modellen används vid dimensionering behövs endast ett minimum av fysikaliska parametrar för de ingående materialen då transport av värme och brandgaser är den primära simuleringsuppgiften. Vid brandutredningar krävs en helt annan kännedom om startföremål, ytterligare föremål som antänds, flamspridning och släckeffekter. Dessa egenskaper kräver kunskap om flertalet fysikaliska parametrar, vilka är svår att känna till

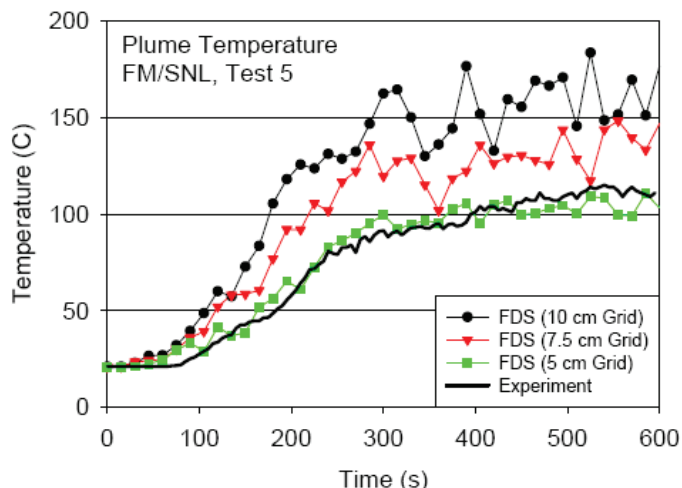
och simuleringarna blir därmed osäkra. Den förkolningsmodell som finns i FDS är under utveckling och bör inte tillämpas vid dimensionering.

### 5.3.3 Beräkningsdomänen

Gridupplösningen, dvs. antalet celler som beräkningsdomänen delas upp i är den enskilt viktigaste numeriska parametern för beräkningens kvalitet. De flesta parametrar är beroende av cellstorleken, där bland flammhöjd och plymtemperatur, men även temperaturen i delar av det övre brandgaslagret. Till skillnad från zonmodellen så kan fältmodellen redovisa hur temperaturen fördelar sig inom det övre brandgaslagret. Denna information är exempelvis av intresse om temperaturpåverkan på kritisk utrustningen eller bärande konstruktion ska utvärderas. Problemen med för stora celler är framförallt relaterade till:

- ♦ Luftinblandning i plymen.
- ♦ Flöden genom öppningar.
- ♦ Att resultaten blir för mycket ”medelvärden”.

FDS beräknar turbulensen och därmed luftinblandningen numeriskt, vilket skapar ett stort beroende till vald cellstorlek. Om cellerna är för stora blir luftinblandningen för dålig, vilket i sin tur resulterar i för höga plymtemperaturer. Detta visas i figur 24 och diskuteras ytterligare i avsnitt 5.4.3.

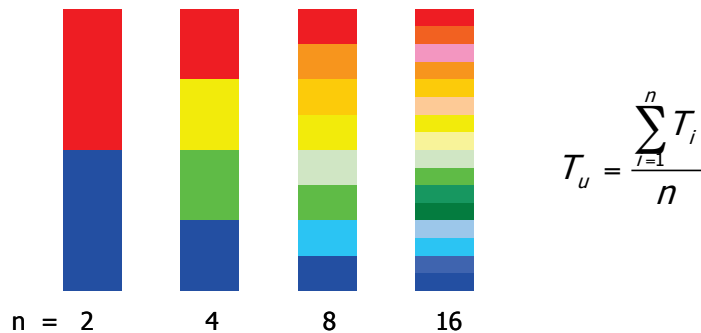


**Figur 24** Jämförelse mellan uppmätt och beräknad plymtemperatur för olika cellstorlekar (McGrattan m.fl. 2010).

Flödet genom öppningar begränsas av en flödeskoefficient (vanligen benämnd  $C_d$ ), vilken är direkt proportionell med det massflöde som passerar genom öppningen. Vid användning av empiriska korrelationer för ventiler av brandgaser sätts ofta  $C_d$  till 0,6-0,7, men i FDS beräknas flödeskoefficienten direkt som en numerisk parameter där antalet celler som spänner över öppningen är avgörande för flödet genom öppningen. Flödet i de celler som gränsar till öppningens kanter kommer få ett reducerat flöde kopplat till kanternas ”vidhäftning” och om antalet celler i öppningen är litet i förhållande till antalet celler som rör vid kanterna kommer flödet genom öppningen att begränsas på ett realistiskt sätt.

Den tredje punkten i ovanstående lista på problem vid för stora celler relaterar till hur kvantiteterna (massa, temperatur, hastighet, etc.) beräknas. Värdena som FDS presenterar är medelvärden för resp. cell och om cellindelningen är för grov kommer extremvärdena (max och min) att underskattas. I figur 25 visas hur temperaturen i det övre brandgaslagret beräknas. Det övre brandgaslagrets temperatur blir densamma oavsett hur många celler som brandgaslagret delas in i. Det som cellindelningen i stället påverkar är temperaturfördelningen inom det övre brandgaslagret. Om brandgaslagret endast består av två celler så har dessa förhållandevis lika temperaturer, vilken är betydligt lägre än den högsta temperatur som kan observeras om

indelningen ökar, samtidigt som den är högre än den minsta temperatur som observeras vid förfinad indelning.

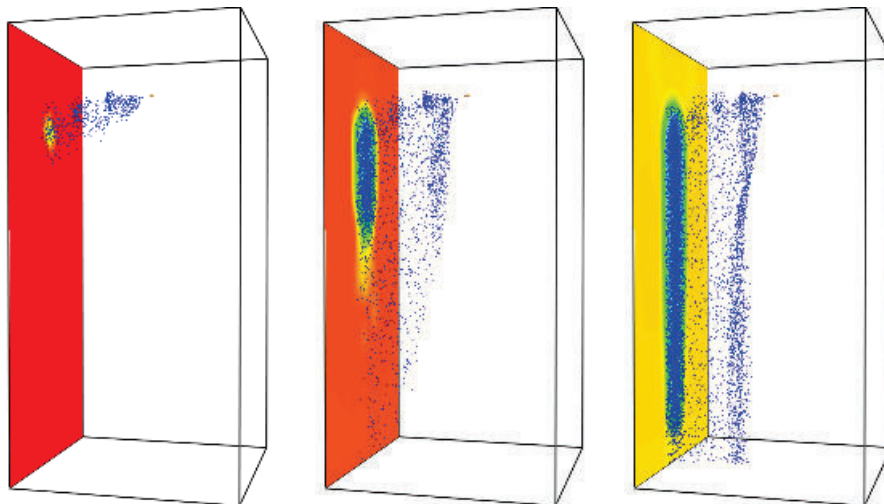


**Figur 25** Illustration av temperaturfördelningen i det övre brandgaslagret, samt en beräkning av brandgaslagrets medeltemperatur för 2, 4, 8 samt 16 celler (i höjdled).

Om temperaturpåverkan på ett objekt som befinner sig i den övre delen av det övre brandgaslagret ska studeras är det viktigt att beakta hur många celler som det övre brandgaslagret består av. En känslighetsanalys får avgöra om cellindelningen är tillräcklig.

### 5.3.4 Vattensprinklersystem

FDS har även en modell för att studera effekten av sprinklersystem där vattendroppar injiceras med en användarspecificerad hastighet. Användaren måste också ange specifik information om sprinklerhuvudet som t.ex. sprayvinkel. Det finns begränsad tillgång till nödvändiga indata för att kunna modellera sprinklersystemens släckverkan på ett korrekt sätt. Vidare kräver FDS en orimligt fin gridupplösning för att kunna beakta hur de vattendroppar som injiceras fördelar sig i rummet och vilken verkan de har på brandens utveckling. Detta gör sammantaget att sprinklermodellen i FDS inte i skrivande stund bör användas för att beskriva effekten av en aktiverad sprinkleranläggning. I figur 26 visas hur vatten påverkar en ytas temperatur i FDS.



**Figur 26** Illustration av vattens inverkan i FDS (McGrattan m.fl., 2010).

Att kyla en yta är den primära funktionen för ett sprinklersystem i FDS då modellen inte tar hänsyn till eventuell släckeffekt som branden har såvida inte användaren anger att se ska ske. Om detta är aktuellt ska ett bränslespecifikt tal, kallat "e-koefficient" anges vilken beskriver med vilken hastighet som effektutvecklingen avtar efter sprinkleraktivering. Värden på denna koefficient är mycket svåra att få tag på.



## 5.4 Validering

FDS har tillsammans med några andra brandmodeller genomgått en omfattande validering dokumenterad i NUREG-1824 (2007). Vid valideringen har simuleringar jämförts med data från experiment. Slutsatser har dragits beträffande följande kvantiteter:

- ♦ Det övre brandgaslagrets temperatur och höjd
- ♦ Temperatur i plymen och takstrålen
- ♦ Flamhöjd
- ♦ Koncentration av syrgas och koldioxid
- ♦ Sotkoncentration
- ♦ Tryck i brandrummet
- ♦ Värmestrålning och konvektion samt temperatur på olika föremål i rummet.
- ♦ Värmefflöde i väggar och väggens yttemperatur

För varje egenskap har FDS fått en gradering, vilken antingen kan vara **GRÖN** eller **GUL**. Om FDS tilldelas **GRÖN** gradering innebär detta att de fysikaliska modellerna i FDS har en god korrelation till experimenten. Vid **GUL** gradering behöver användaren vara försiktig och se över antaganden och beakta modellens giltighetsområde.

### 5.4.1 Övre brandgaslagrets temperatur och höjd

Att bestämma temperaturen och höjden på det övre brandgaslagret är något som FDS är lämpligt för. Detta gäller både i brandrummet och i angränsande utrymmen. En första ansats på gridupplösningen  $D^*/\delta x$  kan vara 5, men en känslighetsanalys med ett fördubblat värde på  $D^*/\delta x$  bör utföras.

Gradering: **GRÖN**

### 5.4.2 Temperaturen i takstrålen

FDS är lämplig för att bestämma temperaturen i takstrålen, vilken i sin tur påverkar aktiveringstiden för sprinklerhuvuden och värmedetektorer. Temperaturen i takstrålen är dock mer känslig för gridupplösningen än vad exempelvis det övre brandgaslagrets temperatur är. Anledningen till detta är att gridupplösningen styr luftinblandningen i brandplymen och om upplösningen är för låg, underskattas också denna inblandning med högre temperaturer och hastigheter som följd. För låg upplösning ger alltså snabbare aktiveringstider än vad som påvisas i experiment. Ett lämpligt värde på  $D^*/\delta x$  kan vara 10, vilket ökas till åtminstone 15 i en känslighetsanalys.

Gradering: **GRÖN**

### 5.4.3 Plymtemperatur

Att på ett så korrekt sätt som möjligt representera brandplymen är viktigt för ett bra simuleringsresultat. Anledningen till detta är att brandplymen är motorn i transporten av brandgaser i byggnaden. FDS bygger på strömning orsakad av termiska skillnader och en felaktigt bedömd plymtemperatur får en direkt påverkan på flera parametrar såsom utbredningen av det övre brandgaslagret, temperaturen i det övre brandgaslagret och i takstrålen, osv. FDS har vissa problem med att uppskatta plymtemperaturen, vilket beror av dels på modellens svårighet att bedöma flamhöjden och dels på känsligheten för gridupplösningen. Flamhöjden diskuteras i avsnitt 5.4.4 och parametrarnas koppling till gridupplösningen är densamma som för temperaturen i takstrålen, redovisad i avsnitt 5.4.2.

Gradering: **GUL**

#### 5.4.4 Flamhöjd

FDS har en tendens att överskatta flamhöjden, vilket anses ha en koppling till den förbränningsmodell (mixture fraction) som FDS använder. Förbränningsmodellen är helt enkelt för enkel för att på ett korrekt sätt kunna representera flamman. Detta kan ställa till problem för simuleringen då aktiveringstider förkortas, samt att strålning från flamman överskattas. Återigen är det gripupplösningen  $D^*/\delta x$  som har störst betydelse för resultat. Ett lämpligt värde på kvoten när flamhöjden är viktig är 15.

Gradering: GUL

#### 5.4.5 Koncentration av syrgas och koldioxid

FDS har en förmåga att bedöma koncentrationen av syrgas och koldioxid om själva förbränningsreaktionen är välkänd. En brand består ofta av flera material, t.ex. trä, plast, brandfarliga vätskor osv. FDS kan dock endast hantera en förbränningsreaktion, vilket gör att den brand som FDS beräknar skiljer sig åt från vad som hade varit fallet vid en verklig rumsbrand. Undantagsfallen är de scenarier då det brinnande materialet är välkänt och det inte sker någon spridning av branden till andra brännbara material. Men, även om förbränningsreaktionen skulle vara välkänd, så fungerar FDS endast för välventilerade förhållanden.

Gradering: GRÖN

#### 5.4.6 Sotkoncentration

FDS är lämplig för att studera transport av brandgaser och sot inom byggnaden. Dock har modellen svårt för att bedöma hur mycket sot som en brand genererar. Detta löses genom att ange en sotproduktion som en andel av massavbrinningen, t.ex. 0,05 g/g. Dessa värden finns i litteraturen och gäller oftast för välventilerade förhållanden, vilket därmed blir en begränsning för FDS. Ytterligare en parameter som påverkar sotproduktionen är om en stor del av flamman går in i det övre brandgaslagret. Detta fall liknar en underventilerad brand, med ökad sotproduktion som följd.

Gradering: GUL

#### 5.4.7 Tryck i brandrummet

Kontinuitetsekvationerna för massa och energibalans ger tillförlitliga bedömningar av trycket i brandrummet. Dock är parametern beroende av läckageytor och ventilationsförhållanden, vilka kan vara svåra att bedöma och öka osäkerheten vid jämförelse med experiment.

Gradering: GRÖN

#### 5.4.8 Värmestrålning och temperatur på mottagande objekt

Modellerna för att studera värmestrålning ger ett tillfredsställande resultat, men är samtidigt beräkningsintensiva. Om temperaturen i ett mottagande objekt ska bedömas måste detta objekt ha en enkel geometri så att modellens ”diskreta värmestålar” inte missar objektet. Osäkerheten ökar om objektet befinner sig nära branden, vilket beror på att FDS har vissa problem med att bedöma flamhöjden (avsnitt 5.4.4) och plymtemperaturen (avsnitt 5.4.3).

Gradering: GUL



#### 5.4.9 Värmefflöde i väggar och väggtemperatur

Modellerna för att titta på värmeledning är tillförlitliga, men förhållandevis enkla. Värmeledning kan endast hanteras endimensionellt, vilket betyder att exempelvis en pelare mitt i ett rum endast kan hettas upp i en riktning. FDS kan inte ta hänsyn till att värme leds in i objektet från olika håll.

Värmeledningen är starkt kopplad till materialets fysikaliska egenskaper och svårighet att bedöma dessa ökar osäkerheten vid jämförelse med experiment. Precis som för värmestrålningen (avsnitt 5.4.8) ökar osäkerheten om avståndet mellan mottagande objekt och branden är kort.

Gradering: GUL

### 5.5 Vägledning för kvalitetssäkring

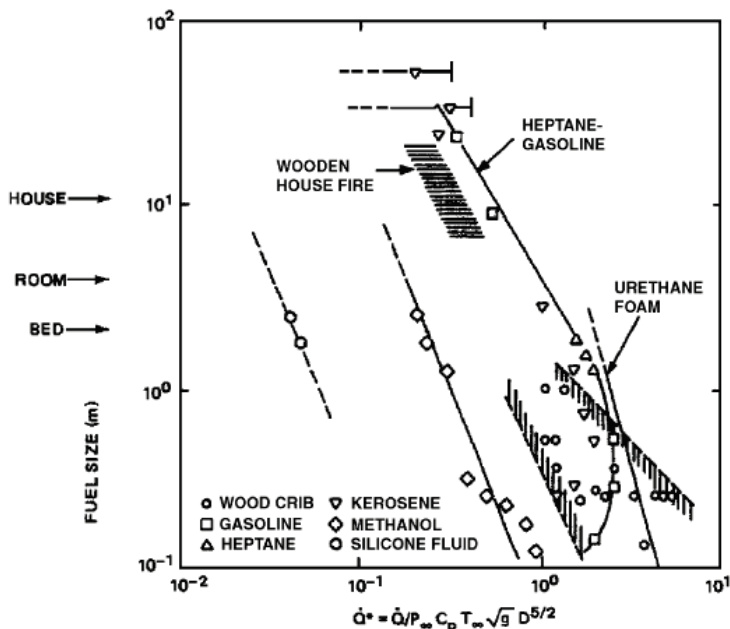
I detta avsnitt redovisas några av de mer betydelsefulla teknikerna för kvalitetssäkring av beräkningar i FDS. Avsnittet belyser bl.a. branden, förbränningsmodellen, beräkningsdomänen, materialdata samt viktiga utdata som ska användas för att kontrollera beräkningsresultatet.

#### 5.5.1 Brandens och dess effektutveckling

Det är betydelsefullt att den brand som simuleras i FDS specificeras av användaren och inte är en brand där FDS själv försöker beräkna effektutvecklingen. Det finns några riktlinjer för att branden och dess effektutveckling, vilka redovisas nedan:

- Den dimensionslösa effektutvecklingen  $Q^*$  ska vara i intervallet 0,3 till 2,5.

$Q^*$  är ett mått på hur stark branden är i förhållande till sin yta. En gasbrännare har t.ex. ett högt värde på  $Q^*$ , medan en brand som omfattar en hel byggnad har ett förhållandevis lågt värde, se figur 27. FDS är skapad för simuleringar av strömning i låga hastigheter och värdet på  $Q^*$  bör hållas inom ovan angivet intervall för att modellerna i FDS ska gälla.



Figur 27 Den dimensionslösa effektutvecklingen  $Q^*$  för olika typer av bränder.

Den dimensionslösa effektutvecklingen  $Q^*$  beräknas med ekvationen nedan:

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}}$$

Där:

$Q^*$  = Brandens karakteristiska effektutveckling.

$\dot{Q}$  = Brandens effektutveckling, kW.

$\rho_{\infty}$ ,  $c_p$ ,  $T_{\infty}$  = Densitet (1,2 kg/m<sup>3</sup>), värmekapacitet (1,0 kJ/kg/K) och temperatur hos luft (293 K).

$g$  = Tyngdaccelerationen, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

$D$  = Brandens diameter, m.

Ofta är det önskvärt att låta brandens effektutveckling förändras med tiden. Detta skapar vissa problem i FDS då effektutvecklingen beräknas som en funktion av brandens yta och en användarangiven effektutveckling per ytenhet (HRRPUA). Om effektutvecklingen ska förändras över tiden måste antingen den yta som branden upptar eller värdet på HRRPUA ändras. Ett vanligt sätt att styra effektutvecklingen är användandet av en funktion kallad TAU\_Q, vilken reglerar HRRPUA så att den önskvärda effektutvecklingen fås vid en viss tidpunkt. Om användaren t.ex. anger "TAU\_Q = 461" betyder detta att branden når sin maximala effekt efter 461 s och att tillväxten från 0 till 461 s sker enligt formen  $Q = \alpha \cdot t^2$ . Värdet på TAU\_Q beräknas med kännedom om brandens tillväxthastighet och dess maximala effektutveckling. Just värdet 461 s ger en brand på 10 MW vid en tillväxthastighet på 0,047 kW/s<sup>2</sup>. Konkret innebär TAU\_Q att FDS för varje tidssteg beräknar andelen av HRRPUA som ska användas. En brand på 10 MW kan exempelvis uppta en yta på 10 m<sup>2</sup> och utveckla i 1 000 kW/m<sup>2</sup>. I tabell 12 visas aktuellt värde på HRRPUA om denna brand tillväxer kvadratisk med snabb (0,047 kW/s<sup>2</sup>) tillväxthastighet.

**Tabell 12 Användning av TAU\_Q för att skapa ett tidsberoende för effektutvecklingen.**

| Tid, s | Effekt, kW | Andel av $Q_{\max}$ | HRRPUA, kW/m <sup>2</sup> |
|--------|------------|---------------------|---------------------------|
| 0      | 0          | 0,00                | 0                         |
| 60     | 169        | 0,02                | 17                        |
| 120    | 677        | 0,07                | 68                        |
| 180    | 1 523      | 0,15                | 152                       |
| 240    | 2 707      | 0,27                | 271                       |
| 300    | 4 230      | 0,42                | 423                       |
| 360    | 6 091      | 0,61                | 610                       |
| 420    | 8291       | 0,83                | 830                       |
| 461    | 10 000     | 1,00                | 1 000                     |

Eftersom TAU\_Q ändrar HRRPUA kommer också värdet på  $Q^*$  att ändras och då brandens yta är konstant finns det risk för att  $Q^*$  är mindre än specificerat värde på 0,3 i simuleringens början. För ovanstående exempel blir  $Q^* > 0,3$  först när HRRPUA är större än 800 kW, vilket enligt tabell 12 motsvarar drygt 400 s. Innan denna tidpunkt är alltså branden för svag för att FDS på

ett korrekt sätt ska kunna beräkna flamhöjd, plymtemperatur, etc. Det finns några möjliga tekniker för att undvika detta problem. En av dem blir att minska brandens area och öka dess effektutveckling. Om branden skulle uppta 5 m<sup>2</sup> och ge 2 000 kW/m<sup>2</sup> blir  $Q^* > 0,3$  när branden utvecklar c:a 3,5 MW, vilket efter c:a 270 s.

Ett annat sätt som kan användas är funktionen "SPREAD\_RATE". Denna funktion anger med vilken hastighet (m/s) som en viss egenskap ska sprida sig längs en yta. Kopplingen mellan "SPREAD\_RATE" och brandens tillväxthastighet ( $\alpha$ ) ges av ekvationen nedan:

$$SPREADRATE = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{1}{HRRPUA}}$$

När "SPREAD\_RATE" används kommer HRRPUA hela tiden att ha sitt maximala värde och det är möjligt att finna en uppsättning av värden på brandens area och dess effektutveckling per ytenhet som hela tiden ger korrekta värden på  $Q^*$ .

- ♦ Om brandens effektutveckling ska ändras över tiden bör funktionen "SPREAD\_RATE" användas för att på ett korrekt sätt representera branden innan dess att den maximala effektutvecklingen uppnås.

### 5.5.2 Förbränningsmodellen

Förbränningsmodellen i FDS kan enbart hantera en förbränningsreaktion. Det är därför lämpligt att det material som brinner utgör en blandning av de material som förväntas brinna i det aktuella scenariot. Vidare kan FDS inte användas för underventilerade bränder, vilka påverkar själva förbränningsreaktionen. I samband med simuleringar bör följande beaktas:

- ♦ Om förbränningsreaktionen ändras till en blandning av material är det viktigt att det nya "materialet" på ett så korrekt sätt som möjligt representerar blandningen. Utöver produktionen av kolmonoxid och sot bör även branden energivärde (MJ/kg) justeras så att massavbrinningen (kg/s) blir korrekt.
- ♦ Kontrollera ventilationsförhållandena och se om det är nödvändigt att justera sotproduktionen (se avsnitt 3.5).

### 5.5.3 Värmestrålning

Det är möjligt att stänga av strålningsmodellen i FDS, vilket kortare ner simuleringstiden, men samtidigt förloras viktig information som påverkar simuleringsresultat.

- ♦ Om strålningsmodellen stängs av bör detta kompenseras för genom att ta bort den andel av brandens effektutveckling (c:a 30 %) som blir värmestrålning.

Om värmestrålningen mot kritiska objekt ska studeras kan det vara nödvändigt att öka antalet "strålar" som FDS skickar ut i beräkningsdomänen. Förinställt värde på 100 kan i vissa sammanhang inte vara tillräckligt, vilket observeras av förekomsten av "hot spots" på omslutande ytor.

- ♦ Gör en känslighetsanalys för att avgöra om strålningsmodellen är tillräckligt noggrann för aktuellt problem.

### 5.5.4 Beräkningsdomänen

Följande aspekter ska beaktas när beräkningsdomänen sätts upp:

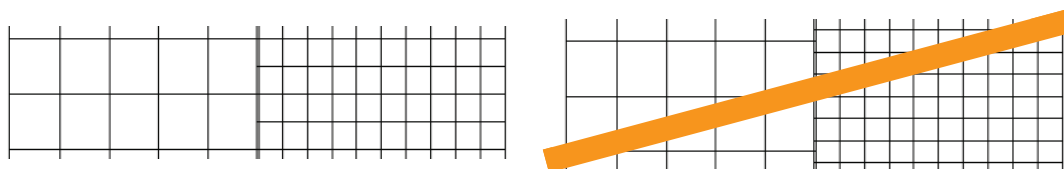
- ♦ Kvoten  $D^*/\delta x$  som beskriver gridupplösningen bör vara i storleksordningen 10-20 nära branden.

Analysen där plymtemperaturer och värmetransport är viktigt kräver en finare gridupplösning, medan analysen av det övre brandgaslagrets temperatur och höjd kan tolerera en grövre upplösning.

- ♦ En finare cellindelning krävs för själva branden och vid öppningar för brandgasventilation eller nära taket om detektionstider ska studeras.
- ♦ Det ska inte finnas några tryckavlastade öppningar (SURF ID = 'OPEN') nära öppningar för till- och frånluft.
- ♦ En känslighetsanalys ska göras för att bedöma om cellstorleken är tillräcklig. En sådan analys görs genom att minska cellernas storlek till dess att de studerade parametrarna inte ändras signifikant (< 10 %).

Det är betydelsefullt att låta beräkningsdomänen omsluta byggnaden på ett sådant sätt att de tryckavlastade öppningarna inte sitter en bit utanför byggnaden. Om de placeras i tak eller väggar kommer brandgasventilationen att fungera mindre effektivt då den rörelsemängd som brandgaserna har neutraliserats så fort de kommer i kontakt med den tryckavlastade öppningen.

- ♦ Cellerna ska vara kubiska (i förhållande 1:1:1).
- ♦ Beräkningsdomäner får inte överlappa varandra, utan ska placeras kant i kant. Om cellstorleken är olika i två angränsande domäner ska cellstorlekarna anpassas så att ett helt antal mindre celler passar till den andra domänens större celler, se figur 28.



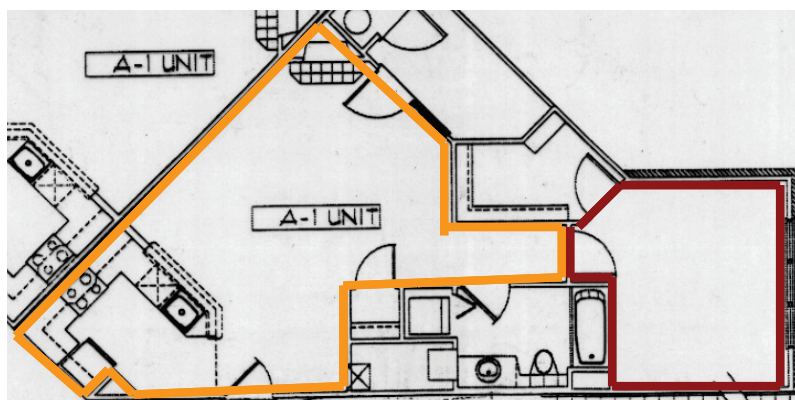
**Figur 28** Placering av beräkningsdomäner med olika stora celler bredvid varandra. En cell i den domän med finare upplösning får inte tvingas skicka information till mer än en cell i den domän med grövre upplösning.

- ♦ Gränser mellan beräkningsdomäner ska inte placeras där strömningshastigheterna är höga, t.ex. vid branden eller ventilatorer.
- ♦ Om ett objekt ligger i en domängräns är det viktigt att kontrollera att båda beräkningsdomänerna "ser" objektet.
- ♦ Alla objekt, konstruktioner, öppningar etc. som kan tänkas påverka strömningen i beräkningsdomänen ska inkluderas. Om förenklingar görs är det nödvändigt att visa att dessa är giltiga.

Utöver kvoten  $D^*/\delta x$ , vilken relaterar brandens effektutveckling till beräkningsdomänens utformning är det viktigt att studera förhållandet mellan brandens storlek  $D^*$  och rumshöjden  $H$ . Kvoten  $D^*/H$  indikerar plymens relativa betydelse för transport av brandgaser. I avsnitt 5.4.3 beskrivs plymen mer i detalj.

- ♦ Om  $D^*/H$  är litet (< 0,5) ska gridupplösningen justeras så att  $D^*/\delta x$  blir  $\geq 15$ .

I FDS kan rummets geometri och innehåll kan endast beskrivas med rätblock. I verkligheten har ofta rum en annan geometrisk form, se figur 29.

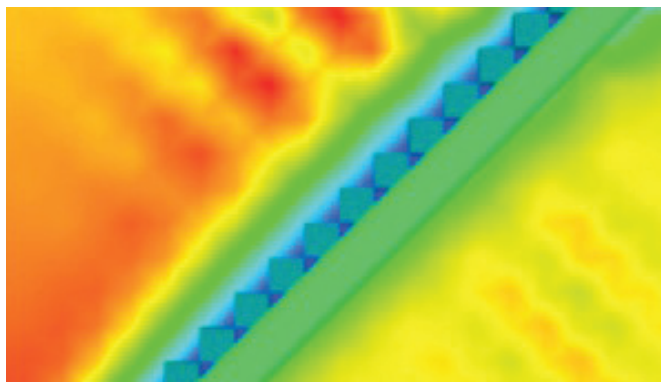


**Figur 29** Exempel på rumsgeometri som inte kan beskrivas med rätblock.

Det är inte nödvändigt att bygga upp geometrier i FDS som strikt följer det geometriska utseende i den byggnad som studeras. Förenklingar kan göras och för att hantera geometrier som inte har formen som rätblock rekommenderas följande tekniker:

- ♦ Är det övre brandgaslagrets höjd och temperatur av intresse så ska rummets volym hållas konstant.
- ♦ Om tunnlar och längre korridorer studeras är det viktigt att hålla kvoten mellan längden och tvärsnittets area konstant.
- ♦ Om värmeledning till omgivande väggar ska studeras så ska de omslutande ytornas area hållas konstant.

Om det finns ett behov av att rita upp väggar som inte är rätvinkliga eller om taket i byggnaden slutar kan detta göras i FDS genom att placeras flera små rätblock bredvid varandra och sidoförlytta dem en och en. Detta skapar dock en sågtandad geometri, vilken ger en flödesbild som inte överensstämmer med verkligheten, se figur 30.



**Figur 30** Strömningen utmed en sluttande yta, skapad med små rätblock vilka sidoförskjutits. Den "övre" delen får en oönskad turbulens skapad av rätblockens kanter. Denna effekt har FDS kompenserat för i den "undre" delen, vilket en mer verklighetstrogen strömning (McGrattan m.fl., 2010).

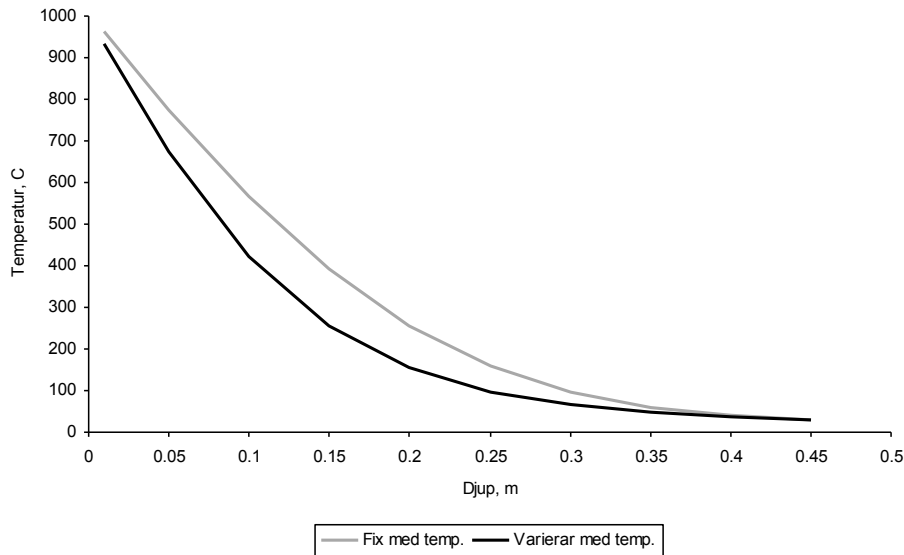
- ♦ Om rätblock används för att representera sluttande tak eller sneda väggar ska detta kompenseras för genom att använda funktionen "SAWTOOTH=FALSE." för varje berört objekt.

### 5.5.5 Materialdata

Värmeförluster till omslutande konstruktioner är alltid av intresse vid en brandteknisk analys. Dessa värmeförluster är viktiga för att få rätt temperatur i det övre brandgaslagret och för att

kunna beräkna väggtemperaturer etc. FDS använder "INERT" för materialegenskaper om användaren inte definierar andra värden. INERT medger värmetransport från brandgaserna till konstruktionen, men konstruktionens temperatur förändras inte. Som ett resultat av detta kommer värmetransporten inte att ändras efterhand som temperaturen i rummet (och väggen) ökar, vilket är normalfallet för de flesta material.

I figur 31 visas hur temperaturen i en vägg, vilken har en ytemperatur på 1 000° C. Ett det ena fallet har ingen hänsyn tagits till värmeledningens temperaturberoende, vilket gjorts i det andra fallet. Skillnaden blir påtaglig, framför i temperaturer upp till 400° C.



**Figur 31 Redovisning hur temperaturen i en konstruktion beror av om hänsyn tas till att värmeledningskoefficient varierar med temperaturen.**

Värmeledning i i väggar styrs av materialets densitet, värmeledningsförmåga och värmelagringskapacitet. Vid simuleringar i FDS ska följande beaktas:

- ♦ Variabler som styr värmeledningen till omslutande ska beskrivas med ett temperaturberoende som materialets egenskaper ändras som en funktion av temperaturen. Exempel på sådana material är betong, gips och andra skivmaterial.

### 5.5.6 Vattensprinklersystem

Det är möjligt för FDS att ta hänsyn till effekter av en vattensprinkleranläggning, men denna funktion är för närvarande att beakta som aktiv forskning och ej för användning vid brandtekniska analyser. FDS kan dock användas till att beräkna aktiveringstid för sprinklersystemet vilket kräver att sprinklerhuvudets aktiveringstemperatur, RTI-värde och C-faktor anges. I en sådan beräkning är det också viktigt att beakta modellens känslighet när det gäller beräkning av plym- och takstråletemperaturer, se avsnitt 5.4.2 och 5.4.3.

### 5.5.7 Utdata

För att kunna kvalitetssäkra beräkningsresultatet är det viktigt att samla in utdata som möjliggör en analys av viktiga parametrar. Följande rekommenderas:

- ♦ Använd "DEV" för att samla in data om temperaturen i plymen och flödet genom öppningar, samt för att kunna ta fram uppskattningar av brandgaslagrets höjd och temperatur.
- ♦ Använd "SLCF" för att visualisera brandförloppet som en funktion av tiden. Viktiga variabler är temperatur och siktbarhet, och i vissa fall även värmestrålning.

- ♦ Använd "PLOT3D" för att sammanfatta data för de tre hastighetsvektorer samt ytterligare två valfria variabler som t.ex. temperatur, effektutveckling, siktbarhet för hela beräkningsdomänen vid en given tidpunkt. Dessa data kan bl.a. användas för att studera flödeshastigheter genom öppningar samt vid övergångar mellan olika beräkningsdomäner.
- ♦ Kontrollera att angiven effektutveckling är densamma som den effektutveckling FDS har beräknat via "HRRPUA" och brandens yta. Kontrollen ska även omfatta ett eventuellt tidsberoende hos effektutvecklingen.

I tabell 13 redovisas några användbara utdatavariabler för FDS.

**Tabell 13      Användbara utdatavariabler för FDS.**

| Variabel                | Enhet                | Förklaring                                                                   |
|-------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| BURNING RATE            | kg/m <sup>2</sup> /s | Massavbrinning per ytenhet                                                   |
| CONVECTIVE HEAT FLUX    | kW/m <sup>2</sup>    | Konvektivt värme flöde (orsakad av strömning av varma brandgaser)            |
| NET HEAT FLUX           | kW/m <sup>2</sup>    | Summan av värme flöde från konvektion (convective) och strålning (radiative) |
| HRR                     | kW                   | Avgiven effektutveckling                                                     |
| INSIDE WALL TEMPERATURE | ° C                  | Temperaturen inuti en vägg                                                   |
| LAYER HEIGHT            | m                    | Uppskattning av brandgaslagrets höjd ovan golv                               |
| LOWER TEMPERATURE       | ° C                  | Uppskattning av nedre lagrets temperatur                                     |
| MASS FLOW               | kg/s                 | Massflöde (t.ex. genom en öppning)                                           |
| RADIATIVE HEAT FLUX     | kW/m <sup>2</sup>    | Värmestrålning mot en punkt/yta                                              |
| TEMPERATURE             | ° C                  | Temperatur i rummet                                                          |
| UPPER TEMPERATURE       | ° C                  | Uppskattning av det övre brandgaslagrets temperatur.                         |
| VELOCITY                | m/s                  | Strömningshastighet                                                          |
| VISIBILITY              | m                    | Siktbarhet                                                                   |
| WALL TEMPERATURE        | ° C                  | Temperatur på ytan av en vägg                                                |

## 5.6 Checklista

Följande checklista kan användas för att säkerställa simuleringen beaktar vissa aspekter som är kritiska för resultatets kvalitet.

### *Innan simuleringen*

- ♦ Kontrollera att  $Q^*$  är i storleksordningen 0,3 till 2,5.
- ♦ Kontrollera att beräkningens upplösning  $D^*/\delta x$  är i storleksordningen 10 till 20. Inledande simuleringar kan göras med en kvot på c:a 5 för att grovt undersöka vissa variabler.
- ♦ Kontrollera att beräkningsdomäner kopplas ihop på ett korrekt sätt och att objekt som finns i fler än en domän är synliga i samtliga. Kontrollera att det inte finns några gränser mellan domäner i områden med mycket strömning.
- ♦ Kontrollera förbrännings- och materialegenskaper.
- ♦ Kontrollera att strålningsmodellen används och att omslutande ytor har korrekt definierade egenskaper för värmeledning.

### *Efter simuleringen*

- ♦ Kontrollera strömningen i anslutning till beräkningsdomänens gränser med fokus på öppningar till det fria och ”öppningar” mellan beräkningsdomäner. Hastigheterna ska vara relativt låga ( $< 10$  m/s).
- ♦ Kontrollera att flamtemperaturen är i storleksordningen 700 till 1 200° C.
- ♦ Jämför flamhöjden beräknad av FDS med den som fås vid handberäkning.
- ♦ Kontrollera att den adiabatiska flamtemperaturen inte överskrider 1 300° C.
- ♦ Kontrollera förekomsten av ”hot spots” på omslutande väggar, vilket kan indikera att strålningsmodellen behöver förfinas.
- ♦ Kontrollera att beräknad effektutveckling överensstämmer med en effektutveckling som angivits. Notera om branden blir underventilerad.



## 6 Referenser

- Anderberg Y., Pettersson O., (1992). Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner - del 1, Statens råd för byggforskning, Stockholm.
- Audouin, L., Chandra, L., Consalvi, J.-L., Gay, L., Gorza, E., Hohm, V., Hostikka, S., Ito, T., Klein-Hessling, W., Lallemand, C., Magnusson, T., Noterman, N., Park, J.S., Peco, J., Rigollet, L., Suard, S., van Hees P. (2011) Quantifying differences between computational results and measurements in the case of a large-scale well-confined fire scenario. Nuclear Engineering and Design, vol 241, pp. 18-31.
- Babrauskas, V. (1982). Will the Second Item Ignite, Natl. Bur. Stand. (U.S.), NBSIR 81-2271.
- Babrauskas, V. (2008) Heat Release Rates. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.
- Boverkets byggregler (BBR), BFS 1993:57 med ändringar t.o.m. BFS 2008:6 (2008). Boverket, Karlskrona.
- Bryan, J.L., (2008). Behavioural Response to Fire and Smoke, Chapter 3-11, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.
- Buchanan, A.H., (2002). Structural design for Fire Safety, Wiley.
- Cheong, M.K., m.fl., (2009). Calibrating an FDS Simulation of Goods-vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehamar Experiment, Journal of Fire Protection Engineering August vol. 19 no. 3 pp. 177-196.
- Davidsson, G. m.fl., (2003). Handbok för riskanalys, Rapport U30-626/02, Räddningsverket, Karlstad.
- Dey, M., (2010). Lessons learned in ICFMP Project for Verification and Validation of Computer Models for Nuclear Power Plant Fire Safety Analysis, Deytec Technical report no. 2010-01, Deytech Inc.
- Dey, M. Evaluation of Fire Models for Nuclear Plant Fire Safety and Risk Analysis. Deytec Technical report no. 2009-05, Deytech Inc.
- Fredholm, L., (2010). Översikt av nationell och internationell kravbild avseende brandskydd på kärnkraftverk och hur dessa tillämpas i svensk kärnkraftindustri, rapport 2010:10, Strålsäkerhetsmyndigheten, Stockholm.
- Gay, L., Epiard, C., och Gautier, B. (2005). *MAGIC Software Version 4.1.1: Mathematical Model*, EdF HI82/04/024/B, Electricité de France, France.
- Heskestad, G. (2008). Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.
- Holmstedt, G., Bengtson, S., Blomqvist, P., Dittmer, T., Hägglund, B., Tuovinen, H. och van Hees, P. (2008). Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader, rapport 3144, avdelningen för brandteknik och riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lund.
- Hostikka, S., (2008). Development of Fire Simulation Models for Radiative Heat Transfer and Probabilistic Risk Assessment, VTT Publications 683, Espo.
- IAEA (2004). Safety Guide NS-G-1.7: Protection against Internal Fires and Explosions in the Design of Nuclear Power Plants. Vienna.
- ISO/DTS 16733, (2004). International Organization for Standardization (ISO), Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires.

- ISO/TS 13571, (2002). International Organization for Standardization (ISO), Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data.
- Jensen L. (1996). Undersökning av rökspridning via ventilationssystem med PFS, Rapport TABK—96/7035, Institutionen för byggnadskonstruktionslära, Lunds tekniska högskola, Lund.
- Karlsson, B., Quintiere, J.G. (2000). Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, Boca Raton.
- Klote, J.H., Milke, J.A., (2002). Principles of Smoke Management, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Lazario, M., m.fl. (2008). Numerical Simulation of Fire Growth, Transition to Flashover, and Post-Flashover Dynamics in the Dalmarnock Fire Test, Fire Safety Science – Proceedings Of The Ninth International Symposium, pp. 1377-1388.
- Ma, T.G., Quintiere, J.G., (2003). Numerical simulation of axi-symmetric fireplumes: accuracy and limitations, Fire Safety Journal 38, pp. 467–492.
- McDermott, R.J., (2010). Toward FDS 6: Complex geometry, embedded meshes, and quality assessment, European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD, Lisbon, Portugal, 14-17 June.
- McGrattan, K., och G.P. Forney, (2005). Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- McGrattan, K.B., Forney, G.P., (2010). Fire Dynamic Simulator (Version 5) – User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, National Institutes of Standards and Technology, Gaithersburg.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R.J., (2010). Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, NIST Special Publication 1018-5, National Institutes of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Mowrer, F., Brannigan, V., Purser, D., (2002). A Probabilistic Approach to Tenability Criteria, Proceedings from the 4th International Conference on performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Society of Fire Protection Engineers.
- NKB, (1994). Nordic Committee on Building Regulations, Performance Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation, Report nr. 1994:07 E.
- NRC, (2009). Regulatory guide 1.189 Rev 2. Fire protection for nuclear power plants. Office of nuclear regulatory research U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- NUREG-1805 (2004). Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- NUREG-1824 (2007). Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Vol 1: Main Report, EPRI 1011999, Final Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- NUREG-1934 (2010). Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG), Draft Report for Comment, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- NUREG-6850 (2005). Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Vol 1&2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC .
- Paté-Cornell, E. (1996) Uncertainties in risk analysis: six levels of treatment. Reliability and Systems Safety, vol. 54, no. 2, pp 95-111.
- Peacock, R.D., Jones, W.W., Reneke, P.A., and Forney, G.P., (2008). CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) User's Guide, NIST Special Publication 1041, National Institutes of Standards and Technology, Gaithersburg .

Purser, D.A., (2008). Toxicity assessment of combustion products, Chapter 2-6, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.

SKIFS 2004:2 (2004). Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer, Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.

SS-EN 13501-2 (2007). Brandteknisk klassificering av byggprodukter och byggnadselement - Del 2: Klassificering baserad på provningsdata från metoder som mäter brandmotstånd, utom för produkter för ventilationssystem, Svensk Standard.

SS-ISO 8402:1994 (1994). Kvalitetsledning och kvalitetssäkring – Terminologi, Svensk Standard.

SSMFS 2008:1 (2008). Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar Strålsäkerhetsmyndigheten, Stockholm

SSMFS 2008:17 (2009). Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer. Strålsäkerhetsmyndigheten, Stockholm

Tewarson, A., (1996). Heat release rate in diffusion flames, *Thermochimica Acta* 278, pp. 19-37, Elsevier Science B.V.

Tewarson, A. (2008). Generation of heat and chemical compounds in fires. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.

Walton, W.D., Thomas, P.H. (2008). Estimating Temperatures in Compartment Fires. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4<sup>th</sup> edition, National Fire Protection Association, Quincy.