Risk- och kostnadsvärdering av alternativa brandskyddslösningar

Charlotte Andersson

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet

Report 5027, Lund 1999

Risk- och kostnadsvärdering av alternativa brandskyddslösningar

Charlotte Andersson

Malmö 1999

Risk and cost assessment of alternative fire protection designs

Charlotte Andersson

Report 5027
ISSN: 1402-3504
ISRN: LUTVDG/TVBB--5027--SE

Number of pages: 112
Illustrations: Charlotte Andersson

Keywords
Fire safety optimisation, alternative design, trade-offs, technical exchange, risk analysis, risk assessment, fire safety at nuclear power plants, fire safety design, cost analysis.

Abstract
This paper deals with the concept of trade-off and comparisons between different fire protection alternatives. Fire protection regulations concerning the building process and the nuclear power industry are being discussed. Different methods of decision analysis as well as risk analysis and uncertainty analysis are presented. A method of how to make quantitative risk and cost assessment between different fire protection alternatives, or trade-offs, is presented. The method contains both risk and cost analysis which make a safety and cost optimisation possible. Uncertainty analysis can be used within the method. The method is demonstrated on a nuclear power plant problem.

Brandteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet
Box 118
221 00 Lund

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

Telefon: 046 - 222 73 60

Department of Fire Safety Engineering
Lund University
Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

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

Telephone: +46 46 222 73 60

Summary

The objective of this report is to describe the situation of today regarding risk assessment of trade-offs, or alternative design, in the fire safety engineering process. The objective is also to present, and demonstrate a method of how to estimate the safety differences between different fire protection alternatives. The method shall also make it possible to make a fire protection optimisation. The objectives of the optimisation are fire safety and cost.

A trade-offs is an alternative solution meant to replace the solution presented in prescriptive regulations. A trade-offs, or alternative design, must result in an equal safety level as the originally prescribed solution, or, if established, in an acceptable safety level.

Performance based fire safety regulations are getting more and more common in building regulations all over the world. This is creating an urging need for methods that makes it possible to compare different fire safety solutions, both with each other and/or regarding to acceptable risk criteria or safety levels.

In the seventies when many of the nuclear power plants in Sweden were built, there were no complete regulations about fire safety. This has led to that today's fire safety regulations are very hard to live up to for these plants and in many cases it is necessary to make compromises in form of trade-offs or alternative solutions. Fire safety regulations for nuclear power plants are, because of the many trade-offs that have to be made, developing towards performance based fire safety regulations.

Until now there has been no general method of how to assess trade-offs, this has given the authorities a very difficult time when they are put to examine the fire safety situation, both at a nuclear power plant and in regular buildings. For a long time the only demonstration of equal safety level consisted of argumentation. Today most demonstration of equal safety levels is done by simple deterministic calculations, taking no consideration of reliability of active or passive system, and the result is impossible to use for comparing with a risk criteria. In Sweden no explicit risk criteria has been established. The absence of explicit risk criteria is sometimes seen as an excuse for not doing risk based analyses, but even if there are no explicit risk criteria to compare with it is still possible to compare different fire safety alternatives and to optimise the fire safety for an object.

With the method presented in chapter 6 it is possible to both make comparisons between safety levels created by different fire protection alternatives, passive as well as active, and to optimise the fire protection of the object regarding fire safety and cost (lifecycle cost).

The method is built up by the following eight main steps:

1. Identification of problem and objectives
2. Identification of possible fire scenarios
3. Creating a limit state function
4. Identification of fire protection alternatives
5. Risk assessment of fire protection alternative
6. Comparison of risk levels
7. Quantifying lifecycle cost for each alternative
8. Decision analysis – choosing the best alternative

The risk assessment contains sensitivity and uncertainty analysis depending on the need for accuracy and on the sensitivity of the problem. The risk levels are compared by the most probable value of each alternative as well as risk profiles. If an acceptable safety level is established the alternatives can be compared with these, and if not the risk levels of the alternatives are compared with the risk level of a somehow approved alternative. The suitability of the latter is dependent of whether the approved alternative is applicable on the object or not. An approved alternative can for example be a solution that has been presented in former, more prescriptive, regulations.

The method presented in chapter 6 can be used both in ordinary building projects as well as in complicated upgrading projects at nuclear power plants. This report only contains a demonstration of a nuclear power plant fire safety problem. When using the method at a common building problem some development of the method is needed. The most important difference when using the method on a common building problem instead of a nuclear power plant problem is that the main safety objectives are not the same. In common buildings the most important safety objective is safe escape for the people in the building, for a nuclear power plant the main safety objective is to secure a safe reactor stop. This leads to different definitions of the limit state function and thereby different types of consequences and different possibilities to present the result. Eventually it will also influence on the process of choosing the best, or optimal, alternative.

The demonstrating example contains risk- and cost comparison between 17 different fire safety alternatives. The result shows that no one of the alternatives can give as high safety level as the alternative with physical separation between the redundant safety equipment. The result also shows that a sprinkler system can be replaced with other fire safety alternatives without lowering the safety level and generating a much lower life cycle cost. One conclusion that can be drawn from the demonstrating example is that even if a fire safety alternative is presented as a trade-off possibility in regulation it can not be taken for granted that the resulting safety level is as high as the originally prescribed solution.

The presented risk and cost assessment method is quite time consuming, especially when used on new types of problems. Though, when the problems are alike it is possible to reuse parts of analysis done before, and thereby shortening the requested time essentially. The method ends up giving a good base for making an optimal decision, and in the long run this will save both time and money.

Sammanfattning

Målet med rapporten är att beskriva dagens kunskapsläge vad gäller riskvärdering av tekniska byten eller alternativa brandskyddslösningar. Målet är även att presentera och demonstrera en metod för värdering av skillnader i erhållen säkerhetsnivå med olika brandskyddslösningar. Metoden skall också möjliggöra en optimering av brandskyddet med avseende på säkerhet och kostnad.

Ett tekniskt byte är en alternativ lösning som skall ersätta en lösning som presenteras i preskriptiva regler. Det tekniska bytet, eller alternativa lösningen, skall uppfylla minst samma säkerhetsnivå som den ursprungliga brandskyddslösningen. I de fall då accepterade riskkriterier finns tillgängliga kan dessa användas för att visa att lösningen genererar en acceptabel säkerhetsnivå.

Funktionsbaserade byggnadsregler blir alltmer vanligt över hela världen. Detta genererar ett stort behov av metoder som kan användas för att jämföra olika brandskyddsalternativ, både med varandra och med befintliga acceptanskriterier.

På sjuttiotalet då flertalet av de svenska kärnkraftverken byggdes fanns inga fullständiga brandsäkerhetskrav för kärnkraftverk att tillgå. Brandskyddet i de svenska kärnkraftverken har förbättrats successivt men för att uppfylla dagens preskriptiva regelverk skulle stora byggnadsändringar krävas. För att undvika stora byggnadsändringar men ändå uppnå en acceptabel säkerhetsnivå krävs olika typer av tekniska byten. Detta har lett till att intresset för tekniska byten, eller alternativa brandskyddslösningar, har blivit mycket stort och att funktionsbaserade regler är på framfart.

Fram till i dag har det inte funnits någon generell metod för att värdera tekniska byten, eller alternativa lösningar. Detta har medfört stora svårigheter för myndigheterna att bedöma en byggnads brandskydd. Under lång tid har det enda sättet att demonstrera begreppet ”likvärdig säkerhet” varit genom argumentation. I dagens läge används ofta deterministiska beräkningar för att påvisa ”likvärdig säkerhet”. Dessa beräkningar tar inte hänsyn till felsannolikheter på aktiva och passiva system och resultatet kan inte jämföras med ett framtaget riskkriterie. I Sverige finns inga vedertagna riskkriterier, vilket har använts som ursäkt för att ej genomföra riskbaserade analyser. Riskbaserade analyser är dock ofta nödvändiga för att byggnadens totala brandskydd skall kunna värderas och oberoende av förekomsten av riskkriterier så är det möjligt att jämföra olika brandskyddsalternativs säkerhetsnivå samt att optimera brandskyddet för en byggnad.

Med den metod som här presenteras i kapitel 6 är det möjligt att både jämföra olika brandskyddsalternativs säkerhetsnivå och att optimera brandskyddet med avseende på säkerhet och kostnad (livscykelkostnad).

Metoden är uppbyggd av följande åtta delmoment:

1. Mål- och problemidentifiering
2. Scenarioidentifiering
3. Upprättande av gränstillståndsekvation
4. Identifiering av brandskyddsalternativ
5. Riskvärdering av brandskyddsalternativ
6. Jämförelse av risknivåer
7. Kvantifiering av livscykelkostnad för varje alternativ
8. Beslutsanalys – val av bästa alternativ

Riskvärderingen består av känslighets- och osäkerhetsanalyser i den mån problemets känslighet kräver. Risknivåerna jämförs dels med hjälp av medelvärden och dels med hjälp av riskprofiler. Om uppsatta riskkriterier finns att tillgå kan risknivåerna jämföras direkt med dessa. Om inga riskkriterier finns kan risknivåerna för ett formellt accepterat brandskyddsalternativ användas som referens. Detta kräver dock att det aktuella brandskyddsalternativet är tillämpbart på det aktuella objektet. Ett exempel på en formellt accepterad lösning är en lösning som presenteras i tidigare, mer preskriptiva, regelverk.

Metoden i kapitel 6 är tänkt att kunna användas så väl i vanliga byggprojekt som i komplicerade uppgraderingsprojekt på kärnkraftverk. Det demonstrationsexempel som visas behandlar dock enbart kärnkraftsproblematiken. När metoden skall användas på ett byggprojekt krävs därför en viss metodutveckling. Den största skillnaden mellan att använda metoden inom kärnkraft och vanliga byggnader är det uppsatta skyddsmålet. På ett kärnkraftverk är skyddsmålet reaktorsäkerhet, vilket erhålls genom att förhindra att säkerhetsrelaterade komponenter påverkas negativt av branden. I en byggnad är däremot skyddsmålet säker utrymning för dem som befinner sig i byggnaden. Denna skillnad leder till annorlunda utformning av gränstillståndsekvationen, vilket i sin tur leder till en annan typ av konsekvens och andra möjligheter för resultatpresentation.

Demonstrationsexemplet i kapitel 7 innehåller risk- och kostnadsjämförelser mellan 17 olika brandskyddsalternativ. Resultatet visar att inget alternativ genererar en lika hög säkerhetsnivå som alternativet med fysisk separation mellan säkerhetsrelaterad redundant utrustning, i form av en vägg. Ett av de alternativ som analyserats finns redovisat i de amerikanska nationella kärnkraftreglerna som ett tekniskt byte till just fysisk avskiljning. Detta alternativ gav en risknivå som var 25 gånger högre än alternativet fysisk avskiljning. Ett tekniskt byte som redovisas i ett regelverk behöver alltså inte nödvändigtvis generera en likvärdig säkerhetsnivå som den ursprungliga lösningen. Om detta skall tolkas som att det ursprungliga osäkerheten är överdrivet säker eller om den aktuella lösningen helt enkelt ej är tillämpbar på just detta objekt är oklart. Exemplet visar att även då sprinkler är den mest effektiva enskilda brandskyddsåtgärden så behöver inte det betyda att den är det mest optimala alternativet med avseende på säkerhet och kostnad.

Metoden som presenteras i kapitel 6 och 7 kan tyckas vara mycket tidskrävande, speciellt om problemet är ett annat än det som exemplifierats här. Den tidsåtgång som krävs i initialskedet kan dock ses som en investering för framtiden eftersom ett kontinuerligt användande av metoden möjliggör en avsevärd minskning av den förbrukade tiden. I ett längre perspektiv kan därmed metoden vara ett konkurrenskraftigt alternativ till deterministiska metoder för att exempelvis skapa argument för ett tekniskt byte eller alternativ utformning.

Förord

Detta arbete är ett examensarbete som ingår i utbildningen till civilingenjör, V, på Lunds tekniska högskola. Arbetet skall motsvara 20 poäng.

Rapporten utgör en del i projektet Dimensionering efter beräknad risk: Säkerhetsfaktorer, riskanalys och kostnadseffektivitet. Projektet är initierat av Styrelsen för svensk brandforskning (Brandforsk) och Svenska byggbranschens utvecklingsfond (SBUF).

Ett stort tack till följande brandkonsultfirmor som bidragit med bakgrundsinformation till detta arbete: Brandkonsulten Kjell Fallqvist AB, Brandgruppen AB samt Bengt Dahlgren AB.

Handledare för examensarbetet har varit brandingenjör Tommy Magnusson, Ringhals Vattenfall AB samt Tekn. Dr. Håkan Frantzich, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola.

Innehållsförteckning

SUMMARY ..... **III**

SAMMANFATTNING ..... **V**

FÖRORD ..... **VII**

1 INLEDNING **3**

1.1 BAKGRUND 3
1.2 SYFTE 4
1.3 MÅL 4
1.4 METOD 5
1.5 AVGRÄNSNINGAR 5

2 TEKNISKA BYTEN **7**

2.1 ALLMÄNT 7
2.2 TEKNISKA BYTEN FÖR BYGGNADER 7
2.2.1 Formella tekniska byten *7*
2.2.2 Informella tekniska byten *8*
2.2.3 Tekniska byten på tekniska byten *8*
2.3 TEKNISKA BYTEN PÅ KÄRNKRAFTVERK 8

3 LAGAR OCH REGLER **11**

3.1 PLAN- OCH BYGGLAGEN M.FL. 11
3.1.1 Bygglov *12*
3.1.2 Bygganmälan *12*
3.1.3 Byggsamråd *13*
3.1.4 Kontrollplan enligt PBL *13*
3.2 BYGGREGLER 14
3.2.1 Funktionsbaserade regler *14*
3.2.2 Preskriptiva regler *15*
3.2.3 Framtida byggregler *16*
3.3 LAGAR OCH REGLER FÖR KÄRNKRAFTVERK 17
3.3.1 Determinstiska krav *18*
3.3.2 Probabilistiska krav *18*
3.3.3 Framtida kärnkraftsregler *19*

4 BESLUTSANALYS **21**

4.1 BESLUTS- OCH HÄNDELSETRÄD 22
4.2 FELTRÄD 23

5 RISKVÄRDERING **25**

5.1 ANALYSMETODER 25
5.1.1 Deterministisk analys *25*
5.1.2 Probabilistisk analys *25*
5.2 RISKMÅTT 26
5.2.1 Individuell risk *26*
5.2.2 Samhällsrisk *26*
5.3 KÄNSLIGHETSANALYS 27
5.4 OSÄKERHETSANALYS 27
5.5 OSÄKERHETER I RISKANALYSER 29

6 ANALYSMETOD FÖR UTVÄRDERING AV BRANDSKYDDSALTERNATIV 33

6.1 ALLMÄN BESKRIVNING 33
6.2 MÅL- OCH PROBLEMIDENTIFIERING 34
6.2.1 Förutsättningar och antaganden 34
6.2.2 Objektbeskrivning 34
6.2.3 Övergripande mål 34
6.2.4 Optimeringsmål 34
6.2.5 Skyddsmål 34
6.3 IDENTIFIERING AV BRANDSCENARION 35
6.4 UTFORMNING AV GRÄNSTILLSTÅNDSEKVATION, $G \geq 0$ 35
6.5 IDENTIFIERING AV BRANDSKYDDSALTERNATIV 35
6.6 RISKUTVÄRDERING AV BRANDSKYDDSALTERNATIV 35
6.7 RISKJÄMFÖRELSER 36
6.8 KOSTNADSANALYS 37
6.9 BESLUTSANALYS 37

7 RISK- OCH KOSTNADSUTVÄRDERING AV OLIKA BRANDSKYDDSALTERNATIV PÅ RINGHALS 39

7.1 MÅL- OCH PROBLEMIDENTIFIERING 39
7.1.1 Förutsättningar och allmänna antaganden 39
7.1.2 Övergripande mål 40
7.1.3 Skyddsmål 40
7.1.4 Optimeringsmål 40
7.1.5 Objektbeskrivning 41
7.2 IDENTIFIERING AV BRANDSCENARION 41
7.2.1 Scenario 1 42
7.2.2 Scenario 2 42
7.2.3 Scenario 3 42
7.2.4 Scenariosannolikheter 42
7.3 UTFORMNING AV GRÄNSTILLSTÅNDSEKVATION, $G \geq 0$ 43
7.4 BRANDSKYDDSALTERNATIV 43
7.5 RISKVÄRDERING AV BRANDSKYDDSALTERNATIV 45
7.5.1 Upprättande av händelseträd 45
7.5.2 Beräkning av sannolikhet för sluthändelse 45
7.5.3 Beräkning av säkerhetsmarginal 46
7.5.4 Beräkning av sannolikhet för komponentutslagning, $P(G<0)$ 48
7.5.5 Kvantifiering av konsekvens 48
7.5.6 Beräkning av risk 49
7.6 RISKJÄMFÖRELSER 49
7.7 KOSTNADSANALYS 51
7.8 BESLUTSANALYS 54

8 UTVÄRDERING AV METOD 57

9 DISKUSSION OCH SLUTSATS 59

REFERENSER 61

APPENDIX

APPENDIX A: PROGRAMVARA

APPENDIX B: BRANDSKYDDSALTERNATIV

APPENDIX C: KALKYLBLAD I @RISK

APPENDIX D: INDATA

APPENDIX E: RESULTAT

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Fram till 1995 dimensionerades byggnaders brandskydd efter en typ av preskriptiva regler där rekommenderade lösningar angavs för hur brandskyddet skulle utformas för att uppfylla reglerna. Då dessa lösningsförslag ej kunde följas fick man göra ett så kallat tekniskt byte. Med ett tekniskt byte menas att man istället för att använda sig av en av reglerna godkänd lösning använder en alternativ sådan, som då minst skall uppfylla samma säkerhetsnivå som den rekommenderade lösningen. Bevisning av att det tekniska bytet uppfyllde säkerhetskraven bestod framförallt av resonemang.

År 1995 trädde en ny typ av byggregler i kraft i Sverige. Dessa nya regler, BBR 94 [1], är till stor del funktionsbaserade. Med funktionsbaserade menas att kraven som ställs ej skall innefatta detaljlösningar utan endast krav på en viss funktion vilket ökar möjligheterna för använda av riskbaserade dimensioneringsmetoder. Problemet med värdering av tekniska byten eller alternativa lösningar har dock inte försvunnit i och med det nya regelverket utan snarare accentuerats eftersom det uttryckligen anges att alternativa lösningar är tillåtna om likvärdig brandskyddsnivå kan uppnås.

När man använder sig av riskbaserade dimensioneringsmetoder är den stora frågan hur säker en byggnad skall vara, hur man än gör så finns det ju trots allt alltid en risk. Vid avsaknad av en acceptabel absolut säkerhetsnivå så blir man normalt hänvisad till att sikta på att få en säkerhetsnivå som är likvärdig med en liknande byggnad som uppfyller funktionskraven med hjälp av schablonlösningar.

Syftet med de nya reglerna var att skapa en jämnare säkerhetsnivå. Byggnader som ej passade för att dimensioneras efter schabloner skulle inte längre behöva göra det och krav på analyser och brandskyddsdokumentation skulle ge möjlighet att fastställa/utvärdera en byggnads säkerhetsnivå. En utvärdering av de nya byggreglerna [2] har dock visat att de analyser som görs för att visa att en viss funktion är uppfylld är av väldigt varierande kvalité och omfattning.

Den praktiska betydelsen av BBR 94 ligger annars främst i att det där ställs krav på upprättande av brandskyddsdokumentation. Där skall beskrivas hur funktionskraven blivit uppfyllda. Ett sätt att uppfylla kraven är att följa de schablonlösningar som exempelvis beskrivs i SBN 80 [3]. Dessa lösningar är främst avsedda för byggnader av standardtyp och vid mer komplexa byggnader krävs med största sannolikhet någon form av beräkningar för att visa att funktionskraven verkligen kan uppfyllas med hjälp av schablonlösningarna. Tekniska byten innebär ofta att passiva system som exempelvis ett maximalt avstånd till utrymningsväg kan förlängas tack vara installation av ett aktivt system, såsom brand- och utrymningslarm. Detta kräver, explicit eller implicit, att någon form av riskvärdering måste göras. Att enbart resonera sig fram till att en alternativ lösning uppfyller funktionskraven är i de flesta fall omöjligt eftersom man även måste ta hänsyn till aktiva och passiva systems felfrekvenser.

Dagens allt tuffare ekonomiska klimat ställer ökade krav på ekonomisk optimering av brandskyddssystem. Ett optimalt brandskyddssystem kan beskrivas som ett system som med minsta möjliga medel uppfyller en hög och/eller acceptabel säkerhetsnivå. För att möjliggöra en optimering krävs dock möjlighet att jämföra säkerheten i olika lösningar vilket hittills inte

gjorts i någon större omfattning. Beslutsprocessen har istället gått till på så sätt att en möjlig lösning har tagits fram på mer eller mindre lösa grunder och denna lösning har sedan gjorts så billig som möjlig. Ett exempel på detta är då en brandkonsult vid utförandet av en brandskyddsprojektering med utgångspunkt från schablonlösningar upptäcker att byggnadens arkitektur inte möjliggör användandet av en standardlösning. Att installera ett sprinklersystem är då det första alternativ som konsulten anser kunna uppfylla byggreglerna. Om det sedan inte visar sig att detta alternativ faller utanför byggherrens kostnadsramar så väljs detta alternativ, utan att några risk- och kostnadsjämförelser med andra möjliga alternativ görs.

Precis som för byggsidan så finns inom kärnkraften ingen allmänt accepterad metod för att jämföra olika brandskyddslösningar med varandra. Då kraven på brandskydd har ökat kraftigt sedan de första kärnkraftverken byggdes och då det inte alltid är möjligt att genomföra samma typ av lösningar som på nya kärnkraftverk så är behovet av att utnyttja tekniska byten och alternativa lösningar stort. För att verifiera att de alternativa lösningarna uppfyller en acceptabel säkerhetsnivå krävs att det med hjälp av en analys är möjligt att genom jämföra olika brandskyddsalternativ med varandra.

Även inom kärnkraftsindustrin så börjar funktionsbaserade regler komma på tal. Ett förslag på hur dessa skall se ut för brandsäkerheten är att man behåller det dokument som i dag ställer krav på brandskyddet [4], men att man uttryckligen tillåter andra lösningar om det kan verifieras att den säkerhetsnivå som erhålls med hjälp av dessa tekniska byten är tillräcklig.

Bygg- och kärnkraftsindustrin har alltså ett gemensamt problem nämligen att skapa generella krav för vad en kvantifierad riskvärdering av ett tekniskt byte, eller alternativ lösning, bör innehålla.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att på ett tydligt och objektanpassat sätt möjliggöra kvantitativa jämförelser mellan olika brandskyddslösningars säkerhetsnivåer. Med hjälp av en kostnadsanalys skall man sedan kunna avgöra vilket alternativ som är det mest optimala.

Förhoppningen är att arbetet skall kunna användas som hjälpmedel vid utförandet av framtida analyser och på så sätt bidra till att skillnaderna mellan olika byggnaders säkerhetsnivåer minskar.

1.3 Mål

Målet med arbetet är att:

- Sammanställa och utvärdera kunskapsläget vad gäller tekniska byten och optimering av en byggnads brandskydd
- Utforma och demonstrera en metod för riskvärdering av olika brandskyddsalternativ samt optimering av en byggnads brandskydd, både med avseende på kostnad och säkerhet.

Kostnadsmässigt kommer hänsyn att tas till kostnader för inköp, installation, drift samt eventuell avveckling av respektive brandskyddssystem.

1.4 Metod

För att få en bild av den situation som i dag råder i Sverige med avseende på brandskyddsdimensionering har intervjuer genomförts med ett antal konsulter i branschen. Litteraturstudier har genomförts för att sammanställa hur man hanterar motsvarande frågor internationellt, samt hur ny kunskap och forskning kan tillämpas på området.

För att använda den i rapporten beskrivna riskvärderingsmetoden på kärnkraftverket Ringhals har datorprogrammen PRECISIONTREE, @RISK samt CFAST använts, dessutom har litteraturstudier genomförts för att hitta lämpliga beräkningsmodeller och indata.

1.5 Avgränsningar

De konsulter som intervjuats är endast ett urval, någon heltäckande undersökning har alltså inte genomförts.

De indata som används vid riskvärderingen av olika brandskyddsalternativ på kärnkraftverket Ringhals är i många fall objektsspecifika och kan alltså ej användas rakt av vid riskvärdering av andra objekt.

Med optimering av brandskyddssystem avses i rapporten att uppnå en så hög säkerhetsnivå som möjligt med så små medel som möjligt alternativt att uppnå en lägsta acceptabel säkerhetsnivå till en så låg kostnad som möjligt. Detta innebär att det som kommer att betraktas vid beslut om vad som är optimalt är dels möjligheten att skydda liv och dels kostnad för inköp, installation, drift och eventuell avveckling av brandskyddssystemet. Ingen kostnad-nytta analys, där beaktande av skadekostnader orsakade av brand görs, kommer alltså att ingå i optimeringsprocessen.

2 Tekniska byten

2.1 Allmänt

När avsteg måste göras från de krav som ställs på en byggnad eller ett kärnkraftverk krävs någon form av tekniskt byte, eller alternativ lösning. Ett tekniskt byte kan definieras som en alternativ lösning för att uppfylla ett krav. För att ett tekniskt byte skall anses vara acceptabelt skall det verifieras att säkerheten som erhålls är minst likvärdig med den ursprungliga lösningen, alternativt uppfyller en bestämd acceptabel nivå, om en sådan finns.

Alla tekniska byten, eller alternativa lösningar, kräver alltså någon form av verifiering att acceptabel säkerhetsnivå är uppnådd. Hur detta skall verifieras finns det dock inga riktlinjer för och det finns heller inga definierade acceptanskriterier. För att jämföra olika lösningars säkerhetsnivå krävs ju att säkerheten kvantifieras, men hur gör man egentligen det?

2.2 Tekniska byten för byggnader

Nedan kommer ett antal olika typer av tekniska byten som tidigare använts och ansetts vara acceptabla att presenteras. Ingen av dessa typer blir i dag automatiskt godkända utan det skall för dessa visas att funktionskravet i BBR 94 uppfylls.

2.2.1 Formella tekniska byten

Med formella tekniska byten avses den typ av alternativa lösningar som finns redovisade i de gamla byggnormerna som formellt godkända alternativa lösningar. Exempel på tekniska byten som redovisas i gamla byggnormer, NR [5], SBN 80, [3], är installation av sprinklersystem som ger möjlighet att förlänga avstånd till utrymningsväg, minska väggars brandmotståndstid, minska brandventilationsarea etcetera. Dessa tekniska byten är sedan BBR 94 trädde i kraft ej automatiskt acceptabla, det vill säga att det måste verifieras att dessa lösningar uppfyller de funktionskrav som ställs för varje objekt. I dag sker denna verifiering framförallt med hjälp av argumentation eller en enkel beräkning. Detta kan i vissa fall vara tillräckligt men i många fall ger detta inte en fullständig bild av problemet. Även i de nya funktionsbaserade byggreglerna, BBR 94 [1], finns vissa krav som kan frångås med hjälp av så kallade formella tekniska byten. Ett exempel på detta är att tre eller fler våningsplan ej får ingå i samma brandcell om ej sprinkler installeras.

Ett tekniskt byte i form av installation av sprinklersystem är i realiteten mycket svårt att säkerhetsmässigt värdera. Dimensionering och installation sker normalt enligt Försäkringsförbundets regler för vattensprinkleranläggningar, RUS 120:4 [6], som bygger på att olika typer av verksamhet kräver olika vattentäthet för att en brand skall kunna begränsas. Trots detta så finns det alltid skillnader i hur olika system klarar en brand. Detta beror dels på att de sprinklersystemen som i dag finns installerade i våra byggnader är av mycket varierande kvalité dels på grund av den utveckling som skett inom området på senare år och dels beroende på att stora variationer i underhåll förekommer. Hur det installerade sprinklersystemet klarar en brand beror också på om den verksamhet som bedrivs i byggnaden är likvärdig med den verksamhet som systemet dimensionerats för. Sprinklersystemens förmåga att begränsa en brand är dessutom beroende av vilket underhåll som systemet fått under sin livstid. Alla dessa faktorer tillsammans gör att det är mycket osäkert att en eventuell brand verkligen kommer att kunna begränsas av ett visst sprinklersystem.

2.2.2 Informella tekniska byten

Med informella tekniska byten avses den typ av lösningar som ej är formellt godkända men som, under tiden fram till dess att BBR 94 [1] började gälla, har använts och ej bedömts vara undermåliga. Det vill säga en lösning av typen: ”så brukar man göra”. Att verifiera ett informellt tekniskt bytes säkerhet görs i dag framförallt genom diskussion eller med hjälp av en enklare beräkning.

2.2.3 Tekniska byten på tekniska byten

En ytterligare typ av tekniskt byte är en form av tekniska byten på andra tekniska byten. Ett exempel på det är att installera sprinklersystem som ett tekniskt byte för att uppfylla BBR 94 [1] och sedan göra ett tekniskt byte vid installationen för att uppfylla RUS 120:4 [6]. Detta skulle i slutändan kunna påverka säkerheten eftersom släcksystemets tillförlitlighet skulle kunna komma att förändras, vilket i sin tur skulle påverka sannolikheten för att funktionskravet i BBR 94 uppfylls. Ett annat exempel på ett tekniskt byte av denna typ är att ersätta det tekniska bytet i form av sprinklerinstallation med en manuell beredskap, denna typ av tekniska byten är av ej permanent sort och några analyser av vad de innebär görs sällan. Nedan redovisas ett exempel på vad ett sådant byte kan innebära.

På ett museum i Stockholm utfördes brandskyddsdimensioneringen med utgångspunkt från att hela byggnaden skulle vara totalsprinklad. Ett flertal avsteg från byggreglerna gjordes med motiveringen att sprinkler fanns installerade. Efter en omotiverad sprinkleraktivering beordrade dock museechefen att sprinklersystemet skulle stängas av, till dess att man försäkrat sig om att detta ej kunde hända igen. Securitasvakter anlitades då för att ”ersätta” det avstängda sprinklersystemet. Detta innebar i praktiken att vid brand skulle vakterna säkerställa utrymning, begränsa branden samt ersätta den med hänsyn till sprinklersystemet minskade brandventilationen. Att detta tillfälliga tekniska byte ej uppfyller acceptabel säkerhetsnivå är ju väldigt tydligt, och det enda sättet att upprätthålla säkerheten i ett liknande läge är ju att redan från början ta hänsyn till att sprinklersystemet kan sättas ur funktion. Slutsatsen som kan dras av detta är att riskerna med att aktiva system sätts ur funktion måste ingå som en del i bedömningen av en byggnads brandskydd.

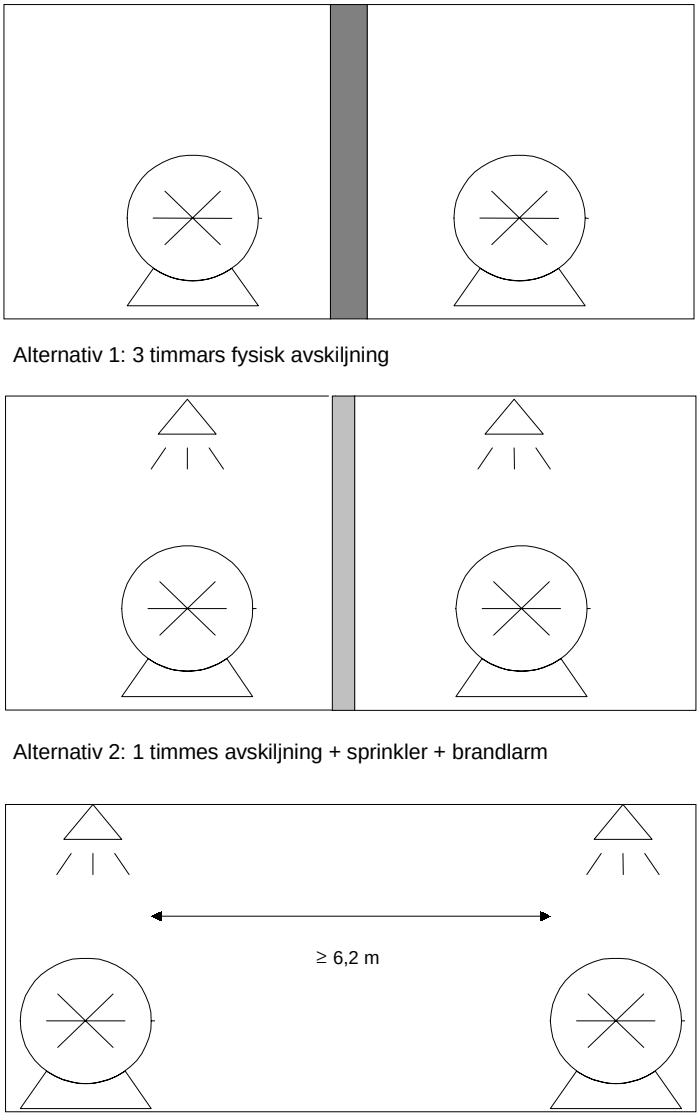
2.3 Tekniska byten på kärnkraftverk

För tekniska byten på kärnkraftverk gäller i princip samma typindelning som för tekniska byten på byggnader. En skillnad är dock att brandskyddsreglerna för kärnkraftverk ej är funktionsbaserade. I kapitel 3 görs en kort genomgång av de för kärnkraften gällande reglerna. I den amerikanska brandskyddsguiden 10CFR Appendix R [4] står ett antal formellt godkända tekniska byten angivna. Exempelvis kan man ersätta en tre timmars brandavskiljande vägg mellan två redundanta säkerhetssystem med ett av följande alternativ:

- 1 timmes brandavskiljning + sprinkler
- sprinkler + 6.2 meters avståndsavskiljning (utan brännbart material)

Redundans innebär att det skall finnas minst två av varandra oberoende system som kan säkerställa en för reaktorsäkerheten viktig funktion. Ett exempel på system som enligt kärnkraftsregler skall ha redundans är system som krävs för att reaktorn säkert skall kunna stängas av.

I figur 2.1 visas en skiss över de tre alternativen för att separera redundanta system.



Figur 2.1 *Tekniska byten enligt 10 CFR 50 Appendix R [4].*

Det första alternativet är det alternativ som skall användas vid nybyggnationer. I befintliga kärnkraftverk är det dock inte alltid möjligt att använda denna lösning vilket har lett till att man tagit fram de alternativa lösningarna 2 och 3 i figuren. Att man med samtliga dessa tre alternativ erhåller en likvärdig säkerhetsnivå finns det dock inga bevis för. Alternativen är mer ett resultat av att något av dem kan användas i de flesta typer av utrymmen.

3 Lagar och regler

Eftersom tillvägagångssättet vid brandskyddsdimensionering är beroende av hur lagar och regler ser ut så kommer här att göras en genomgång av de lagar och regler som påverkar dimensioneringsprocessen och hur de gör det. Speciellt kommer att kommenteras hur de påverkar användandet av tekniska byten eller alternativ utformning.

3.1 Plan- och Bygglagen m.fl.

Plan- och bygglagen (1987:10), PBL, trädde i kraft den 1 juli 1987 och innehåller bestämmelser om planläggning och om byggande. PBL ersätter Byggnadslagen, BL, från 1947, Byggnadsstadgan (BS) från 1957 samt lagen om påföljder och ingripanden mot olovligt byggande (LPI) från 1976. Sedan dess har en förändrad PBL utkommit, gällande från den 1 juli 1995 [7]. Den nya lagstiftningen innebär att bygglovsprövningen enligt PBL begränsas till att avse endast prövning av lokalisering och utformningen av byggnader. Samtidigt införs ett från bygglovsprövningen formellt fristående tillsyns- och kontrollförfarande beträffande de tekniska egenskapskraven på byggnader och andra anläggningar. De tekniska egenskapskraven har överförts till en ny lag (1994:847) om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk m.m., BVL [8]. Huvuddelen av de tekniska egenskapskraven i BVL har sin grund i EU:s byggproduktdirektiv och tillämpningen av dessa bestämmelser är beroende av rättsutvecklingen inom EU. För att möjliggöra smidiga förändringar formuleras de tekniska egenskapskraven mycket kortfattat i BVL och förtydligas förordning och /eller myndighetsföreskrifter. De tekniska egenskapskraven förtydligas i förordningen (1994:1215) om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk m.m., BVF [9].

Bestämmelserna i BVF är indelade med hänsyn till kravens generella giltighet. De allmänna kraven i BVF gäller för alla byggnadsverk som uppförs eller ändras. Vad gäller brand skall ett byggnadsverk enligt de allmänna kraven 4§ BVF vara projekterade på ett sådant sätt att:

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

Boverket får efter samråd med andra berörda myndigheter meddela de föreskrifter som gäller för tillämpningen av exempelvis ovan beskrivna paragraf. Boverket har anpassat de nya byggreglerna, BBR 94 [1] och BKR 94 [10] efter förändringarna i BVL och BVF. BBR 94 och BKR 94 kommer att beskrivas i kapitel 3.2.

Enligt PBL skall ansvaret gentemot det allmänna för att en byggnad uppfyller gällande tekniska krav helt ligga på byggherren, det vill säga den som utför eller låter utföra byggnads- rivnings- eller markarbeten. Detta klargörs genom att lovprövningen inte längre omfattar projektets tekniska egenskaper, utan i stort sett enbart lokalisering, och att byggnadsnämnden åläggs ett renodlat tillsynsansvar rörande dessa egenskaper. Ett nytt administrativt förfarande har införts som ger möjlighet för byggnadsnämnden att efter beviljande av bygglov successivt följa byggprojektet och att ingripa om något är fel. Detta förfarande omfattar följande:

- *Bygganmälan*; ger byggnadsnämnden möjlighet att bedöma behovet av tillsyn och kontroll. Av bygganmälan kan framgå vald brandskyddsstrategi samt en översiktlig redovisning av utrymningsdimensionering. Byggstart får ske tidigast tre veckor efter bygganmälan lämnats. Bygganmälan kan lämnas redan i samband med bygglovsansökan.
- *Byggsamråd*; genomgång av de åtgärder för besiktning, tillsyn och övrig kontroll som är nödvändiga för att samhällskraven skall uppfyllas. Kallelse bör ske snarast möjligt efter att bygganmälan gjorts så att byggherren får kännedom om byggsamrådet innan byggnadsarbetena påbörjas.
- *Kontrollplan*; skall innefattas av byggherrens och kommunens genomgång vid byggsamråd. Byggnadsnämnden skall avgöra om den av byggherren föreslagna kontrollen för att styrka att de tekniska egenskapskraven uppfylls är tillräcklig. Om byggnadsnämnden ej anser att kontrollen är tillräcklig kan beslut tas om tillägg av ytterligare kontroll som byggherren skall utföra.
- *Kvalitetsansvarig*; skall ansvara för att kontrollplanen följs under hela byggprocessen och är normalt utsedd av byggherren.
- *Slutbevis*; utfärdas av byggnadsnämnden då byggherren uppfyllt sina åtaganden enligt kontrollplanen och byggnaden anses klar.

Nedan kommer göras en genomgång av de viktigaste delarna av tillsynen och kontrollen i byggprocessen.

3.1.1 Bygglov

Bygglov krävs för att uppföra, bygga till eller ändra en byggnad eller anläggning. Med bygglov avses ett skriftligt tillstånd som lämnas av byggnadsnämnden enligt PBL. Bygglovsprövningen gäller främst lokalisering och yttre utformning. Bygglovsprövningen omfattar ej byggnadens eller anläggningens tekniska egenskaper.

3.1.2 Bygganmälan

Bygganmälan syftar till att ge byggnadsnämnden möjlighet att förbereda sin tillsyn över byggprojektet och att ge nämnden tid för att preliminärt bedöma kontrollbehovet. Detta innefattar bland annat behovet av byggsamråd.

Bygganmälans innehåll har ej reglerats i föreskrift mer än beträffande vissa grundläggande uppgifter såsom byggherrens namn och adress, CFASTighetsbeteckning samt planerad byggstart. Till bygganmälan skall bifogas en beskrivning av projektets art och omfattning. Vald brandskyddsstrategi samt en översiktlig redovisning av utrymningsdimensionering kan förekomma.

3.1.3 Byggsamråd

När bygganmälan kommit in kallar byggnadsnämnden till byggsamråd. Vid byggsamrådet skall en genomgång göras av

1. arbetenas planering,
2. de åtgärder för besiktning, tillsyn och kontroll som är nödvändiga för att byggnaden eller anläggningen skall kunna antas komma att uppfylla samhällskraven,
3. den samordning som behövs.

Det är byggherren som ansvarar för att den valda tekniska lösningen och för att byggnaden kommer att uppfylla samhällets krav vad gäller till exempel säkerhet. Byggnadsnämnden har möjlighet att förvissa sig om att byggherren tar sitt ansvar genom att begära särskilda bestyrkanden av att samhällskraven är uppfyllda i den utsträckning nämnden anser det behövs.

Vad gäller brandskydd skall det vid byggsamrådet ägnas särskild uppmärksamhet åt bland annat följande:

- Brandskyddsteknisk dokumentation och vald brandskyddsstrategi för exempelvis utrymning och tekniska installationer.
- Säkerställande av brandcellsgränsernas funktion.
- Beklädnad och ytskikt i utrymningsvägar
- Kontroll av dimensionering genom beräkning för BR 1 byggnader
- Brandskyddstekniska installationer som automatiskt brandlarm, sprinklers, brandventilation etcetera.
- Tillgängligheten för räddningstjänsten.

3.1.4 Kontrollplan enligt PBL

Resultatet av byggherrens och kommunens genomgång vid byggsamråd skall dokumenteras i en kontrollplan. I kontrollplanen skall anges vilken kontroll som skall utföras, vilka intyg och övriga handlingar som skall redovisas för nämnden samt vilka anmälningar som skall redovisas för nämnden.

Kontrollen enligt kontrollplanen kan utföras genom byggherrens dokumenterade egenkontroll, av fristående sakkunniga eller, om det finns särskilda skäl, av byggnadsnämnden.

Byggherrens egenkontroll sker genom att den normalt av byggherren utsedde kvalitetsansvarige kontrollerar att kontrollplanen efterföljs.

Kontroll och bestyrkande av fristående sakkunnig enligt PBL kan krävas då bestyrkande genom byggherrens kontroll som ingår i hans eget eller hans entreprenörs kvalitetssäkringssystem av nämnden ej anses vara tillräckligt. Nämnden kräver då intyg från besiktningar eller andra kontroller av fristående, oberoende personer med tillräcklig kompetens (sakkunniga kontrollanter enligt PBL). Sakkunnigintyg kan till exempel avse brandteknisk dokumentation enligt avsnitt 5:12 i BBR 94 [1] eller första brandsyn för byggnad som under sin brukstid regelbundet skall undergå brandsyn.

Byggherren skall själv lämna förslag på vem som kan vara lämplig att vara sakkunnig kontrollant enligt PBL. Om byggnadsnämnden godkänner förslaget är man normalt också

skyldiga att godkänna den slutsats som den sakkunnige kommer fram till. I de fall den sakkunnige anser att det föreslagna utförandet ej är godtagbart måste byggherren ta fram en ny lösning. Hur detta görs varierar men för att bibehålla sin oberoende ställning bör den sakkunnige enligt PBL ej involveras i den nya lösningen förrän all dokumentation är klar och kan bedömas.

3.2 Byggregler

3.2.1 Funktionsbaserade regler

Boverkets byggregler, BBR 94, trädde i kraft den 1 januari 1994 och kom till genom ett översynsarbete av Boverket där det främsta målet var en EU-harmonisering. Detaljerade krav ersattes så långt som möjligt med funktionskrav och anvisning till harmoniserad standard (eller övergångsvis nationell standard).

BBR 94 är en norm som innehåller föreskrifter och allmänna råd, till skillnad från NR som innehöll en hopslagning av föreskrifter och detaljerade anvisningar. BBR 94 är ett funktionsbaserat regelverk vilket innebär att det i bindande föreskrift i första hand anges vad som är syftet med ett krav (vilken egenskap eller funktion som skall uppnås), men inte hur kravet skall uppfyllas. Föreskrifterna är däremot i många fall kvantifierade för att kunna tillämpas på ett enhetligt sätt. Några krav på tekniska lösningar skall dock inte ställas. De allmänna råden förtydligar föreskriftens syfte och/eller ge ett eller flera alternativ på hur kraven kan uppfyllas. De allmänna råden består av bör-råd och kan-råd. Bör-råden innebär en rekommendation från myndigheten då en enhetlig tillämpning är önskvärd. Andra lösningar skall dock godkännas om de uppfyller föreskriftens krav. Kan-råden är avsedda som exempel på ett sätt bland flera hur man kan göra för att uppfylla kraven. Följs inte de råd som anges i BBR måste byggherren se till att man genom beräkning eller brandprovning kan visa att de ställda kraven uppfylls. Hur detta skall visas finns dock inte reglerat.

De viktigaste förändringarna mellan BBR och tidigare byggnormer är följande.

- Funktionskrav
- Krav på brandskyddsdokumentation, verifiering och kontroll
- Beteckningar på avskiljande konstruktioner
- Brandskyddsåtgärder som i huvudsak har som syfte att ge ett visst egendomsskydd har tonats ner. Sådana åtgärder ska istället byggherren själv ställa krav på, bla i samråd med försäkringsgivaren

I BBR 94 [1] avsnitt 5.11 ges möjligheten till avsteg: ”Om byggnader utformas med brandskyddstekniska installationer *utöver* vad som följer av kraven i detta avsnitt (avsnitt 5), får avsteg göras från andra brandskyddskrav i föreskrifterna, om det alternativa utförandet ändå innebär att byggnadens totala brandskydd inte blir sämre än om samtliga krav uppfyllts. Sådana brandskyddstekniska installationer och avsteg skall redovisas i brandskyddsdokumentation enligt avsnitt 5.12”.

Brandskyddsdokumentation skall enligt BBR 94 avsnitt 5.12 finnas med i ansökan om bygglov. Denna första brandskyddsdokumentation skall sedan kompletteras allt eftersom byggprocessen fortskrider för att vara klar då byggnadens slutbevis utfärdas.

Brandskyddsdokumentationen skall innehålla en beskrivning av hur de krav på byggnader och installationer som följer av föreskrifterna i BBR 94 kommer att uppfyllas,

Brandskyddsdokumentationen bör innehålla ritning med brandcellsindelning, utrymningsstrategi, brandtekniska klasser, installationer, kontroll- och underhållsplan, beräkningsförutsättningar samt eventuella avsteg. Enligt en utvärdering av BBR 94 [2] har det visat sig att brandskyddsdokumentationen ofta är bristfällig.

Omsorgsfullt formulerade funktionskrav ger ett ökat utrymme för variation och snabb anpassning till en förändrad verklighet. Svårigheten med att formulera funktionskrav är att formulera dem så att de blir verifierbara, detta visar sig i den kritik som riktats mot BBR 94 där framförallt bristen på acceptanskriterier tas upp. Bristen på acceptanskriterier har lett till att de vägledande designförslag som presenteras i anslutning till de funktionsbaserade kraven, eller i äldre regelverk, ofta ses som den enklaste och bästa lösningen eftersom man annars är osäker på hur man skall gå tillväga för att visa att den alternativa lösningen ger en tillräckligt hög säkerhetsnivå. Detta motverkar ju ett av de syften man hade att införa de funktionsbaserade reglerna, nämligen att främja användandet av nya metoder och tekniker.

Ett vanligt sätt att utforma ett brandskydd i dag är att i så hög grad som möjligt uppfylla brandskyddskraven i BBR 94 genom att använda sig av schablonlösningar. Med schablonlösningar avses i framförallt lösningar som finns presenterade som lösningar eller råd i gamla byggnormer, såsom SBN 80 eller NR. Att dessa schablonlösningar genererar en acceptabel säkerhetsnivå för den aktuella byggnaden är långt ifrån självklart eftersom schablonlösningarna är gemensamma för så många olika byggnadstyper. Då schablonlösningarna ej är tillämpbara, på grund av exempelvis arkitektoniska skäl, så tas en alternativ lösning fram som man genom beräkningar eller argumentation visar är acceptabel. Dessa beräkningar är oftast deterministiska men skall enligt BBR 94 även inkludera känslighetsanalyser. Att detta tillvägagångssätt leder till att byggnadens totala brandskydd inte blir sämre än om samtliga krav uppfyllts är dock osäkert. Detta beror bland annat på följande:

1. Att behandla varje krav separat kan leda till att man tappar helhetssynen över dimensioneringen och exempelvis inte beaktar att vissa brandskyddsåtgärder kanske i själva verket motverkar varandra.
2. Att definiera vad som menas med acceptabel säkerhet är inte enkelt vilket gör det svårt att avgöra om en alternativ lösning är tillräckligt säker eller ej.
3. Det finns alltid en viss sannolikhet för att en brandskyddsåtgärd ej fungerar som det är tänkt. Om detta ej beaktas kan en eventuell brand leda till katastrofala konsekvenser.

Ett exempel på när en alternativ lösning kan påverka en schablonlösning är när man installerar sprinkler. När sprinklerna aktiveras vid brand sänks temperaturen på rökgaslagret och röken sprids snabbt i hela lokalen. De personer som befinner sig i lokalen utsätts därmed snabbt för rökpåverkan och sikten kan i värsta fall bli så dålig att problem med att hitta utrymningsvägar uppstår. Det är med andra ord inte självklart att en sprinklerinstallation ökar personsäkerheten i en byggnad även fast sprinklerna sänker temperaturen och späder ut rökgaserna.

3.2.2 Preskriptiva regler

De tidigare byggnormerna, Svensk Byggnorm, SBN [3] samt Nybyggnadsreglerna, NR [5] är en typ av preskriptiva regler. De har funktionskrav i grunden men hur dessa krav skall/bör uppfyllas regleras med hjälp av föreskrifter och råd. SBN 80 och Nybyggnadsreglerna används i dag vid ombyggnad av gamla byggnader. Det är givetvis också någon av dessa

normer som använts vid nybyggnad de senaste 18 åren, varför flertalet av de tekniska byten som finns i våra byggnader i dag har gjorts för att kompensera avsteg från dessa regler. Det finns förstås byggregler som härstammar längre tillbaka i tiden men dessa kommer inte att behandlas i denna rapport.

SBN 80 innehåller dels föreskrifter, dels exempel på lösningar och metoder som uppfyller kraven i föreskrifterna samt allmänna råd. Föreskrifterna innehåller tvingande krav från myndigheter och enskilda. Exemplen på lösningar och metoder är exempel på av dåvarande planverket godtagna lösningar och metoder. Dessa hade bedömts uppfylla föreskrivna krav under angivna förutsättningar och skall således också godkännas av byggnadsnämnden. Om andra lösningar eller metoder, än de som står angivna i SBN 80, används skall det av bygghandlingarna framgå att de i föreskrifterna uppställda kraven iakttagits. De allmänna råden innehåller rekommendationer som anger hur föreskrifterna eller godkända exempel och metoder kan tillämpas. Byggnadsnämnden får givetvis inte ställa krav på att dessa råd följs men kan kräva en särskild utredning.

NR är uppbyggd på liknande sätt som SBN men istället för att som i SBN skilja mellan exempel på lösningar och metoder och allmänna råd samlas dessa i NR under beteckningen allmänna råd. De i SBN beskrivna exemplen på lösningar och metoder anges i NR istället som allmänna råd. De allmänna råden i NR innehåller alltså rekommendationer om tillämpningen av föreskrifterna och om råden ej följs har byggnadsnämnden rätt att kräva att bygglovsansökan kompletteras med en utredning.

Största nackdelen med alltför detaljerade myndighetskrav är att dessa måste utgå ifrån de tekniska lösningar och behov som är kända vid den tidpunkt då reglerna skrivs. Reglerna kan därmed hindra att nya kreativa lösningar kommer fram. Detaljerade regler kan inte heller enkelt förändras med avseende på nya behov. Det finns dock även fördelar med denna typ av krav, nämligen att de är enkelt verifierbara, ger möjlighet till en snabb projektering och vanligtvis är lätta att tolka.

3.2.3 Framtida byggregler

De funktionsbaserade reglerna möjliggör en flexiblare dimensionering, men också en mer splittrad dimensionering på grund av att problemet ej angrips genom att se på de övergripande målen för brandsäkerheten utan genom att lösa olika detaljproblem. Brandskyddet dimensioneras, i den mån det går utan att inkräkta på aktuell planlösning, efter de schablonlösningar som redovisas eller hänvisas till i exempelvis SBN 80. Om sedan avsteg måste göras från schablonlösningarna så analyseras inverkan av detta separat, antingen med hjälp av en enkel beräkning eller enbart genom resonemang. Denna blandning av angreppssätt kan lätt leda till att oförenliga antaganden görs vid lösning av olika problem i processen. Det är bland annat detta som gör att det är viktigt att fortsätta utvecklingen av de funktionsbaserade reglerna.

För att behålla helhetssynen på dimensioneringen är det nödvändigt med någon form av riskbedömning av hela byggnaden där även en bedömning av den alternativa lösningens inverkan på det övriga brandskyddet ingår. En riskbedömning är nödvändig för att ta hänsyn till den alternativa lösningens tillförlitlighet och anledningen till att man skall göra en bedömning av dess inverkan på det övriga brandskyddet är helt enkelt för att se att de inte på något sätt motverkar varandra. En komplettering av reglerna med råd eller regler för vad som ska ingå i en analys av en brandskyddslösning, förutom generella krav som ”visas genom

beräkning eller provning”, skulle kunna bidra till ett ökat helhetstänkande. Ett förslag på vad en analys av detta slag bör innehålla ges i kapitel 6.

Enligt en artikel i Fire Safety Journal [11] är en av bristerna med funktionsbaserade regler i allmänhet att det ej finns tillräckliga riktlinjer som anger hur man bör gå tillväga vid en dimensionering. Detta gäller som ovan beskrivits även BBR 94. Någon typ av standardiserat tillvägagångssätt, framförallt med syfte att klargöra hur man visar att en lösning är acceptabel, är alltså att rekommendera. Standardiseringen skall försäkra att alla krav och designaspekter har tagits hänsyn till på ett korrekt sätt och att uppställda mål visas vara uppfyllda på ett acceptabelt och kvantifierat sätt. Det finns i dag ett flertal olika handböcker som beskriver dimensioneringsprocessen, dessa innehåller dock inte någon beskrivning av hur säkerhetsnivån skall verifieras och bedömas då man använder sig av alternativa lösningar.

Något annat som saknas i BBR 94 är, som tidigare nämnts, acceptanskriterier. I en guide från British Standard Institute (BSI) [12] beskrivs tre olika typer av acceptanskriterier. Det första är riskbaserat, probabilistiskt, och bygger på att man har en gräns för vilken medelrisk som kan accepteras av samhället beroende på antalet människor som drabbas, det vill säga en FN-kurva. Vad en FN-kurva innebär beskrivs i kapitel 5. Problemet med denna metod är framförallt att det är mycket svårt att avgöra vad samhället anser är acceptabelt och inte.

Det andra acceptanskriteriet är av deterministisk typ och innebär för exempelvis utrymning att en säker utrymning av byggnaden skall kunna ske då ett rimligt värsta scenario inträffar. För att ta hänsyn till osäkerheter i beräkningsmodeller och felsannolikheter för system kan säkerhetsfaktorer behöva tillämpas. Svårigheterna med denna metod är framförallt att bedöma vad som är ett rimligt värsta scenario samt om och i så fall vilka säkerhetsfaktorer som skall användas.

Det tredje acceptanskriteriet fås genom att jämföra den föreslagna lösningen med en lösning som är godkänd enligt reglerna. Detta alternativ ställer stora krav på att den lösning som används som jämförelse har tagits fram med beaktande av säkerhetsfaktorer och att den är tillämpbar på den aktuella byggnaden. Detta är i de flesta fall mycket svårt att avgöra. Jämförelsen mellan lösningar är möjlig att genomföra både med deterministiska och probabilistiska metoder, se kapitel 5.

Även om de preskriptiva lösningarna ej bör ses som den enda vägen skall de heller inte förkastas. Det bör istället ske en fortsatt utveckling och användning av de bästa lösningarna. Det kan i många fall visa sig att de gamla beprövade lösningarna trots allt är vad som är optimalt, speciellt eftersom kostnaden för en analys är hög, dessutom finns det inte alltid behov av att göra en brandskyddsdimensionering efter ingenjörsmässiga principer utan ibland kanske schablonmässiga lösningar helt enkelt passar bättre.

3.3 Lagar och regler för kärnkraftverk

Då de svenska kärnkraftverken byggdes fanns inga heltäckande svenska lagar och regler, varför verken byggdes enligt en blandning av svenska och amerikanska regler. Före den stora branden i kärnkraftverket Browns Ferry, USA, 1975 så fanns inga specifika krav på brandskydd. Branden på kärnkraftverket Browns Ferry, 1975, varade i sju och en halv (7 1/2) timme. Den långa brandtiden berodde framförallt på personalens tveksamhet mot att spruta vatten av rädsla för att kablarna skulle skadas av vattnet. I en studie av från EPRI 1979 [13] visades dock att vatten inte skulle skadat kablarna. De regler som kom till efter denna brand

styr då liksom nu i mångt och mycket brandskyddet på svenska kärnkraftverk. Regelverket heter 10 CFR 50 Appendix R, "Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979” [4]. De krav som ställs på ett svenskt kärnkraftverk i dag är av både deterministisk och probabilistisk art. Nedan kommer att göras en beskrivning av de mest grundläggande kraven tillhörande respektive kategori.

3.3.1 Determinstiska krav

Enligt IAEA:s (International Atomic Energy Association) generella rekommendationsnivå ska följande uppfyllas [14]:

- Säkert kunna stänga ned kärnkraftverket och bibehålla den i säkert läge.
- Säkert kunna resteffektkyla.
- Förhindra otillbörligt höga utsläppsnivåer till följd av brand.

Ovanstående kan uppfyllas genom att utforma brandskyddet på ett sådant sätt att säkerhetsrelaterade funktioner kan upprätthållas även vid en inledande händelse, i form av brand, och ett samtidigt enkelfel. Med enkelfel menas ett av den inledande händelsen oberoende fel som kan inträffa var som helst i anläggningen.

3.3.2 Probabilistiska krav

I Sverige är alla kärnkraftverken ålagda att göra en probabilistisk säkerhetsanalys, kallad PSA (Probability Safety Analysis). Denna analys skall visa om kärnkraftverket har en acceptabel säkerhetsnivå och om så ej är fallet kan analysen användas för att lokalisera var uppgraderingsbehovet är som störst. Med acceptabel säkerhetsnivå menas att sannolikheten för en viss allvarlig skadehändelse ej överstiger en viss nivå för kärnkraftverket som helhet och inte heller för en specifik inledande händelse. En PSA-analys går ut på att kartlägga kärnkraftverkets alla rum med avseende på deras känslighet mot olika inledande händelser, som exempelvis brand. Konsekvenserna av de inledande händelserna delas, beroende på hur allvarliga de är, in i olika skadehändelseklasser. Sannolikheten för att en viss skadehändelse skall inträffa beror av rummets innehåll samt den inledande händelsens art.

Med brand som den inledande händelsen kan man konservativt bestämma ett visst rums bidrag till en viss skadehändelsefrekvens genom att anta att en brand i ett rum inträffar med en viss sannolikhet och att branden slår ut samtliga komponenter i rummet. Bidraget till skadehändelsen beror sedan av vilka säkerhetsrelaterade komponenter som finns i utrymmet och om redundanta komponenter finns i annat utrymme. Det som ovan beskrivits kan kallas för en konservativ brandanalys, eller en konservativ Fire Risk Analysis, FRA.

I PSA-analyserna har det visat sig att brand orsakar en stor andel av den totala risken för allvarliga skadehändelser i ett kärnkraftverk. Detta har lett till att intresset för kärnkraftverkens brandskydd har ökat och vikten av mer detaljerade brandanalyser i PSA har uppmärksammats.

I den traditionella, eller konservativa, brandanalysen i PSA antas att alla komponenter i det rum där branden startat slås ut av branden, oberoende av mängden brandbelastning i rummet och av säkerhetskomponenternas känslighet mot brand. Om inte övertändning förväntas ske i rummet antas att branden ej sprids utanför rummet. För de rum som enligt PSA ger höga bidrag till en viss skadehändelsefrekvens görs i dag betydligt mer detaljerade brandanalyser, eller Fire Risk Analyses, FRA. För respektive rum som pekats ut i PSA görs en osäkerhetsanalys genom att utifrån den befintliga brandbelastningen i rummet simulera

brandförloppet probabilistiskt. Brandens effektutvecklingskurva, maxeffekt, placering samt ventilationsförhållanden varieras och hänsyn tas till de kritiska komponenternas temperaturtålighet. Komponenterna antas slås ut då temperaturen i brandgaslagret som omger dem är högre än komponentens temperaturtålighet. Den probabilistiska brandanalysens resultatet blir för varje rum en sannolikhet för att de kritiska komponenterna i rummet slås ut, vilket sedan kan räknas om till sannolikhet för att en specifik skadehändelse skall inträffa på grund av brand i detta rum och/eller i hela kärnkraftverket.

Då varje rums skadehändelsefrekvens bestämts genom PSA och FRA kan det visa sig att det erfordras åtgärder för att sänka denna frekvens för ett viss rum. För att införa den mest effektiva åtgärden krävs då en jämförelse mellan respektive brandskyddsalternativ, både med avseende på kostnad och säkerhet.

3.3.3 Framtida kärnkraftsregler

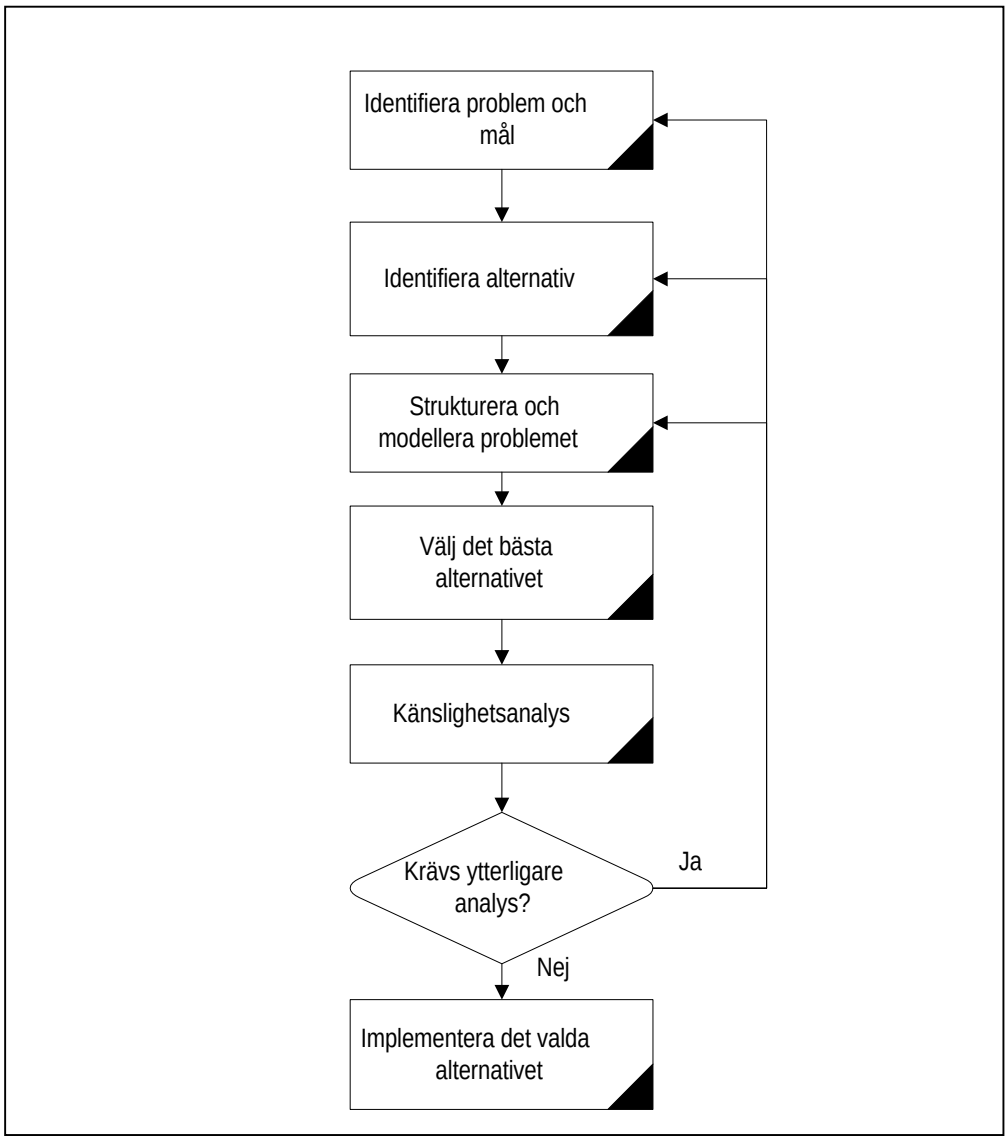
Funktionsbaserade regler inom kärnkraften kan komma att bli aktuella. Det land som kommit längst med dessa planer är USA där ett flertal undersökningar har gjorts angående möjligheterna/riskerna med att införa funktionsbaserade regler. Man har nu ganska långt framskridna planer på att införa någon form av funktionsbaserade regler, men tanken är att ändå behålla de preskriptiva reglerna som finns som en grund. De negativa åsikterna som framförts angående införandet av funktionsbaserade regler har framförallt sin grund i att resultaten av de på kärnkraftverken utförda probabilistiska analyserna (PSA) har varierat väldigt kraftigt, för i stort sett likvärdiga kärnkraftverk, beroende på vilka antaganden och indata som använts i analysen. Det har också ställts krav på att tydliga acceptanskriterier måste finnas innan funktionsbaserade regler träder i kraft så att man på ett rättvist sätt skall kunna bedöma om kärnkraftverken uppfyller kraven eller ej. Från kärnkraftverkens sida är man positiv till funktionsbaserade regler av den anledningen att de ser en möjlighet att spara pengar, men det skulle också underlätta godkännande proceduren på så sätt att alla de nu 800 accepterade avstegen till 10 CFR 50 [4] skulle försvinna och inga nya undantag skulle behöva processas fram.

Även i Sverige håller man för närvarande på att ta fram ett förslag till nya brandskyddsregler för kärnkraft. I princip kommer dessa att utgå från ett grundkrav på fyra redundanta säkerhetssystem med tillägget att avsteg från grundkravet kan accepteras då en probabilistisk analys kan visa att man med en alternativ lösning kan erhålla en acceptabel säkerhetsnivå. Inriktningen är att acceptanskriterierna skall bestå av dels en för hela kärnkraftverket högsta tillåten sannolikhet för en specifik skadehändelse på grund av den inledande händelsen brand och dels en för ett enskilt utrymme högsta tillåten sannolikhet för en viss skadehändelse på grund av brand.

4 Beslutsanalys

För att optimera brandskyddet i en byggnad måste någon form av beslutsprocess genomgås. Vid verkliga beslutsprocesser görs dock sällan någon optimering. Istället försöker man att hitta en lösning som uppfyller de krav som ställs, det vill säga en lösning som är tillräckligt bra men inte nödvändigtvis optimal [15]. Detta är beklagligt eftersom en optimeringsprocess inte behöver vara mer komplicerad än det ovan beskrivna tillvägagångssättet och i många fall kan man tjäna mycket på det eventuella merarbete som blir.

I flödesdiagrammet i figur 4.1 beskrivs hur en beslutsanalys kan gå till [16] och i de följande underkapitlen redovisas lämpliga hjälpmedel vid en beslutsanalys. Noteras bör att flödesdiagrammet i figur 4.1 har stora likheter med det som av IEC (International Electrotechnical Commission) används vid beskrivning av en riskhanteringsprocess [17].

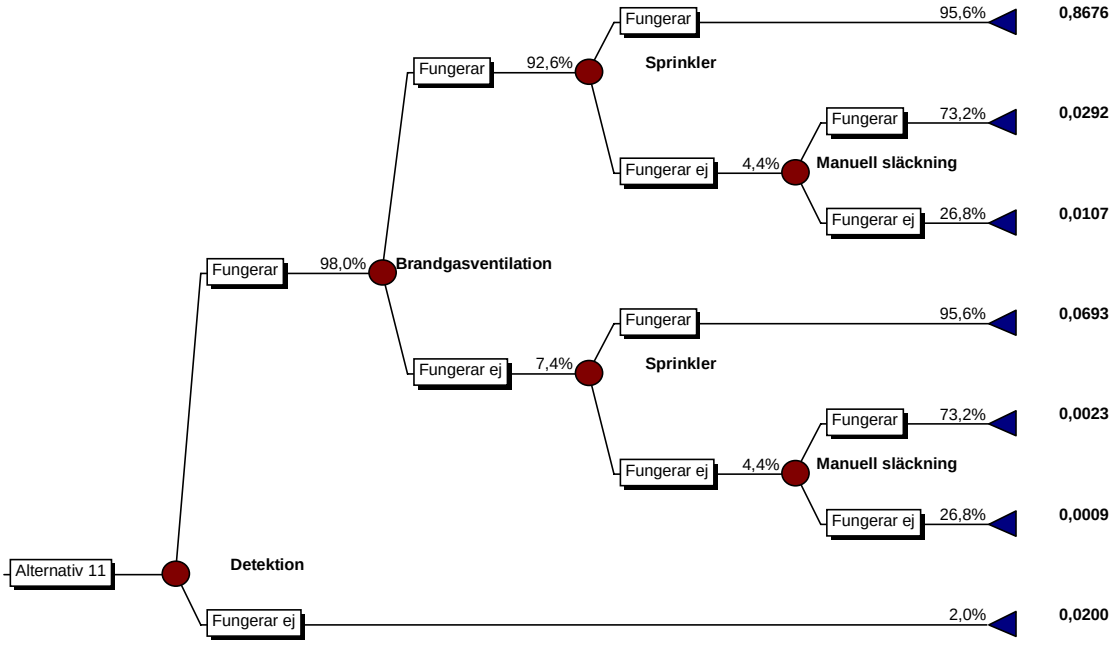


Figur 4.1 *Flödesschema över en beslutsanalysprocess.*

4.1 Besluts- och händelseträd

Ett besluts- eller händelseträd är ett logiskt diagram som kan användas för att åskådliggöra de faktorer som inverkar på exempelvis ett brandförlopp. Händelseträdet är främst till för att beskriva hur de ingående funktionerna/händelserna hänger ihop logiskt och sekventiellt. Beslutsträdet beskriver förutom ingående händelser även de beslutssituationer som ett problem kan bestå utav. I ett beslutsträd representeras en beslutsnod med en fyrkant och en händelsenod med en cirkel. I beslutsträdet anges till skillnad från händelseträdet inga sannolikheter. Den beskrivning som nedan görs av händelseträd gäller i princip även för beslutsträd, med undantag från det som just nämnts.

Vid en inledande händelse finns flera möjliga sluthändelser. Förhållandena vid tiden för den inledande händelsen kommer att avgöra vilken sluthändelse som den inledande händelsen resulterar i. I händelseträdet redovisas den inledande händelsen samt olika delhändelser som leder till olika sluthändelser. Ett händelseträd redovisar flera delscenarior som representeras av sluthändelserna i händelseträdet. Ett exempel på ett händelseträd visas i figur 4.2.



Figur 4.2 *Exempel på händelseträd.*

Med hjälp av ett händelseträd kan exempelvis följande relevanta frågor i en analys identifieras:

- Vad kan hända?
- Med vilken sannolikhet inträffar ett delscenario?
- Vilka är konsekvenserna av respektive delscenario?

Att använda sig av händelseträd kräver en del förenklingar eftersom man ej kan ha alltför mycket detaljer i ett och samma händelseträd. Dessutom är det svårt att inkludera tidsaspekter i händelseträd.

Att använda så kallade kopplade händelseträd är ett sätt att få med fler detaljer med bibehållen lättlästhet och innebär att man utnyttjar möjligheten att ha en konsekvens som

inledande händelse i ett annat händelseträd. För varje konsekvens i huvudhändelseträdet skapas speciella händelseträd, som kan beskriva anläggningsprocessen.

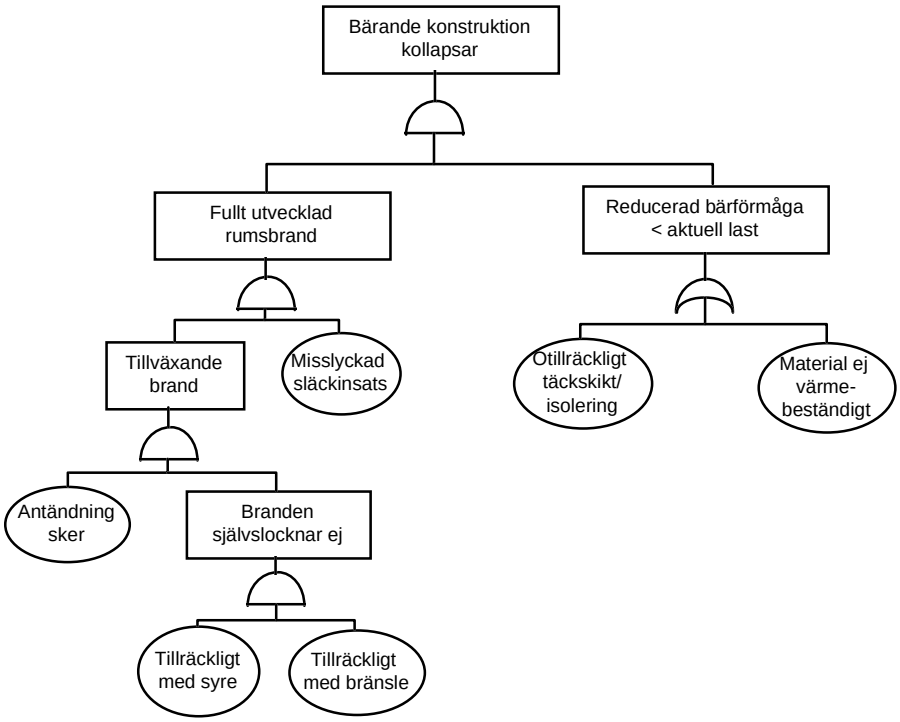
Olika delhändelser i händelseträdet kan vara beroende av varandra. Ett exempel på detta är då ett detektionssystem felfungerar och detta beror på bristande service. Bristfällig service kan ju även påverka andra systems tillförlitlighet varför man kan få ett beroende mellan händelsen ”ingen detektion” och exempelvis ”ingen aktivering av sprinklersystem”. Det finns inget enkelt och självklart sätt att beakta detta varför man bör vara väldigt försiktig när man misstänker att två delhändelser kan vara beroende av varandra.

4.2 Felträd

Sannolikheterna för respektive delhändelse i ett händelseträd kan i komplexa fall bestämmas med hjälp av felträd. Att använda felträd är exempelvis lämpligt när det handlar om komplexa tekniska system där tillförlitlighetsdata endast finns dokumenterad för varje i systemet ingående delkomponent separat.

Felträd kan användas för att exempelvis bestämma felsannolikheten för ett helt system genom att spåra och sammanställa de händelser som kan resultera i den oönskade topphändelsen. Topphändelsen kan inträffa på ett antal olika vägar, där varje väg startar med en inledande händelse. Med kunskap om de inledande händelsernas falsannolikheter kan sannolikheten för topphändelsen beräknas.

De inledande händelserna kombineras med OCH och ELLER grindar vilka slutligen leder till den oönskade topphändelsen. Vid en OCH grind måste samtliga inledande händelser som är kopplade till denna grind inträffa för att nästa steg skall uppfyllas. Vid en ELLER grind gäller motsvarande att endast en av de till grinden kopplade händelserna måste inträffa. I figuren nedan visas ett exempel på felträd.



Figur 4.3 *Exempel på felträd.*

5 Riskvärdering

För att kunna avgöra om ett tekniskt byte eller en alternativ utformning av brandskyddet ger en tillräckligt hög säkerhetsnivå måste man göra någon typ av riskvärdering. Att definiera en risk för enstaka delscenario alternativt sluthändelser kan göras på många olika sätt, i detta arbete definieras en risk som:

Risk = Sannolikhet × Konsekvens

Där det med risk avses risk för påverkan på människa. Med utgångspunkt från denna definition kräver en riskvärdering att man kvantifierar sannolikheten för att något skall inträffa samt konsekvensen av det inträffade. Att göra denna kvantifiering kan dock innebära stora svårigheter. Det finns ett antal olika möjliga tillvägagångssätt för att kvantifiera risken, nedan kommer att ges ett par exempel på detta. Olika typer av riskmått samt hur man kan jämföra risker tas också upp.

5.1 Analysmetoder

5.1.1 Deterministisk analys

En deterministisk analys kvantifierar bland annat brandtillväxt, brandspridning, rökgasspridning, evakueringstid samt konsekvenserna som dessa ger på en byggnad och dess innehåll. Resultatet av dessa beräkningar kan sedan användas för att utvärdera huruvida byggnadens brandskydd är acceptabelt eller inte genom att jämföra med framtagna deterministiska kriteria. De deterministiska kriterierna skall vara uppfyllda för ett troligt värsta scenario. Exempel på deterministiska kriterier finns redovisade i BSI Draft Code of Practice [12].

5.1.2 Probabilistisk analys

För att bestämma en byggnads totala säkerhet måste förutom tidsberoende fysiska och kemiska processerna vid en brand även osäkerheter, som exempelvis människans beteende, om dörrar är öppna eller stängda, brandens placering, mängd och typ av brandbelastning samt tillförlitligheten och effektiviteten av detektions- och släcksystem värderas. Det tidsberoende brandförloppet bestäms vanligtvis deterministiskt varefter osäkerheternas betydelse kan värderas med hjälp av probabilistiska beräkningar och statistiska analyser.

För att värdera risken för en byggnad kan en kombination av deterministiska och probabilistiska beräkningar. Generellt inkluderar en kvantitativ probabilistisk riskanalys följande [18]:

- Framtagandet av ett antal brandscenarion
- En bedömning av respektive scenarios sannolikhet och konsekvens
- Riskberäkning: Risk = Σ(sannolikhet för händelse)*(förväntad konsekvens) alt. FN-kurva
- Jämförelse mellan beräknad och acceptabel risk.

Vad är då acceptabel risk? Ett sätt att bestämma det är att utgå från att eftersom det är accepterat att bygga enligt de gamla preskriptiva reglerna så borde detta generera en acceptabel risk. Att verifiera ett tekniskt byte skulle då kunna göras genom att jämföra den beräknade risken med vad en preskriptiv lösning hade givet för värde på risken. Att göra på detta sätt är dock inte alltid möjligt eftersom det finns byggnader där de preskriptiva reglerna

inte alls är tillämpliga varför man då måste hitta ett annat sätt. Kanske kan man då jämföra med risknivån i en liknande byggnad eller använda sig av någon form av säkerhetsindex. I rapporten ”Synthesis of Deterministic and Probabilistic methods” [19] ges följande definition på ett acceptabel brandskydd: ”En acceptabel design är en sådan som är minst lika säker som en design gjord enligt preskriptiva regler, och som ej är dyrare över byggnadens livstid”.

5.2 Riskmått

5.2.1 Individuell risk

Individuell risk beskrivs vanligtvis som sannolikheten för att en enskild person skall drabbas under ett år. Med hjälp av riskcirklar kan man visa inom vilket område kring exempelvis en fabrik som en viss sannolikhet för dödsfall vid utsläpp finns.

5.2.2 Samhällsrisk

Ett vanligt sätt att beskriva samhällsrisken på är med hjälp av så kallade FN-kurvor. En FN-kurva kan ses som en presentation av frekvensen och fördelningen över antalet döda vid en exempelvis en olycka. Vanligt är också att man har beskriver en acceptabel säkerhetsnivå med en FN-kurva, vilket har den fördelen att man med hjälp av acceptanskurvan kan visa att flera olyckor med få dödsfall är mer accepterat i dagens samhälle än en stor olycka med många döda.

Riskprofil

En FN-kurva är ett specialfall av en riskprofil. I en riskprofil måste det till skillnad mot en FN-kurva ej vara antalet döda som anges, det kan lika gärna vara en kostnad eller antalet skadade.

En riskprofil/FN-kurva kan vara mycket användbar vid en beslutsprocess. Genom att titta på riskprofilerna får beslutsfattaren en mängd information om hur riskfyllda olika alternativ är. I vissa fall kan en beslutsfattare välja mellan olika alternativ enbart med hjälp av deras riskprofiler.

I en riskprofil visar den vertikala axeln sannolikheten att en konsekvens blir mindre eller lika med korresponderande ämne på den horisontella axeln. En riskprofil skapas genom att ackumulera sannolikheterna för varje individuell konsekvens.

Genom att använda idén med dominans så kan man identifiera vissa profiler eller strategier som kan bortses ifrån. Dessa strategier sägs vara dominerade eftersom man med hjälp av vissa grundregler för kumulativa riskprofiler kan visa att det finns bättre alternativ att tillgå. Om ett alternativ är dominerande så ligger dess riskprofil till höger om det alternativets riskprofil som det dominerar. Jämförelse med hjälp av dominans kan endast göras när riskprofilerna inte korsar varandra vilket är en stor begränsning.

Medelrisk

Medelrisk eller väntevärde är ett enkelt sätt att ”lösa” ett händelseträd, det vill säga att bestämma risken för ett delscenario eller ett helt händelseträd. Sannolikheten för alla sluthändelser räknas då ut och vägs samman till en medelrisk. De olika alternativens respektive medelrisker kan sedan jämföras med varandra och det/de alternativ med lägst medelrisk kan väljas.

Nackdelen med att enbart presentera medelrisken är att höga sannolikheter för små konsekvenser kan ge samma medelrisk som låga sannolikheter för stora konsekvenser. I en beslutsprocess kan detta spela stor roll eftersom samhällets tolerans mot många olyckor med få drabbade ofta är större än få olyckor med många drabbade.

Det finns även en koppling mellan riskprofiler och medelrisk som ger att om ett alternativ dominerar ett annat så har det dominerande alternativet alltid den lägsta medelrisken. Då riskprofilerna korsar varandra kan ingen liknande slutsats dras.

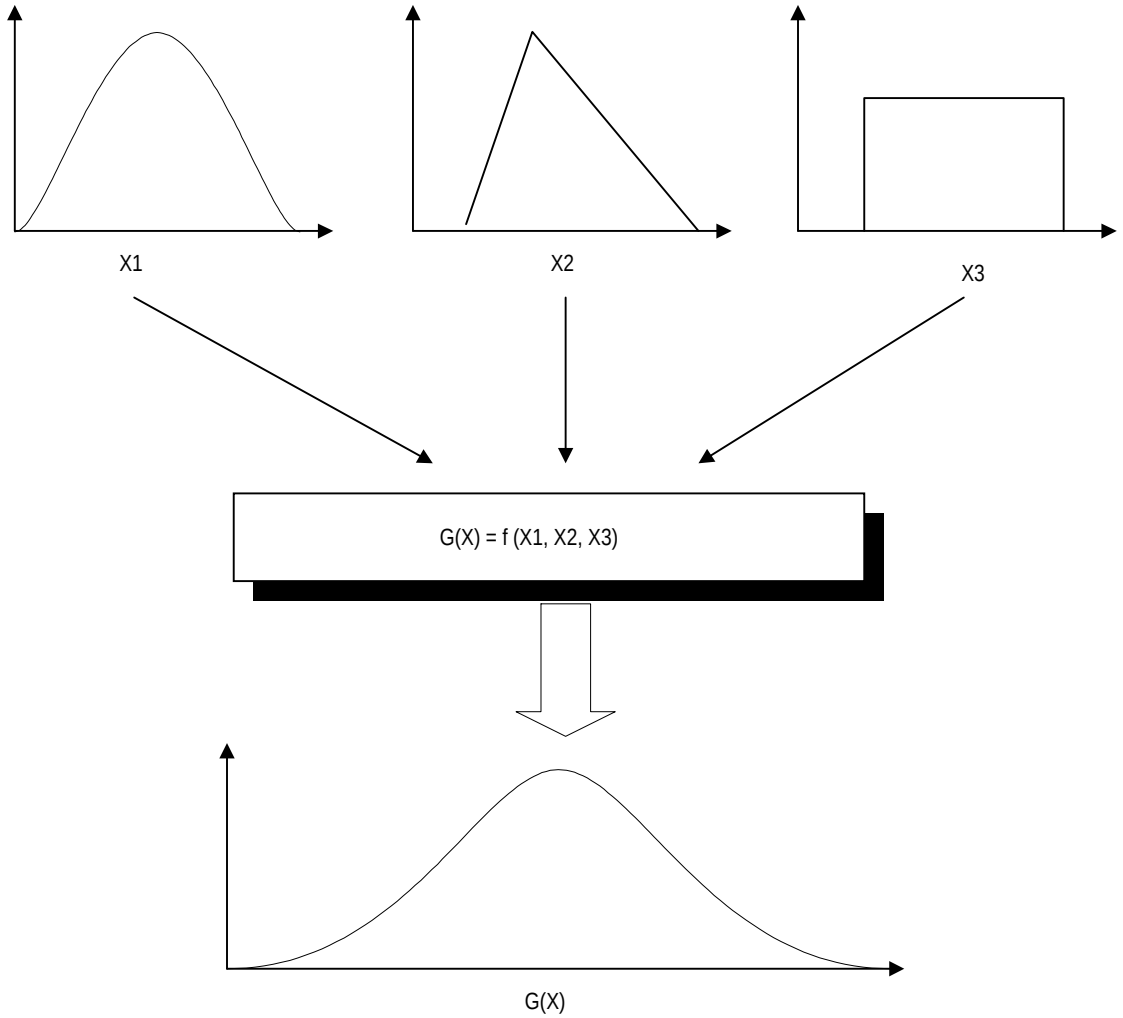
5.3 Känslighetsanalys

Syftet med en känslighetsanalys är att ta reda på om vi löser rätt problem. En känslighetsanalys skall svara på frågan, ”Vad inverkar på det här beslutet?” Faktorer som inte inverkar på beslutet skall givetvis inte tas med i processen varför olika former av känslighetsanalyser bör göras kontinuerligt under processens gång.

Ett exempel på en typ av känslighetsanalys är att ta fram ett så kallat tornadodiagram varur en funktions känslighet för ändringar av respektive ingående variabel kan utläsas. Ett tornadodiagrammet består av de ändringar i funktionens värde som orsakas av att respektive variabel varieras mellan sitt högsta och sitt lägsta värde medan övriga variabler hålls konstanta. Funktionens ändrade värde då respektive variabel ändras studeras och ritas in i ett diagram. Den variabel som har störst påverkan på variabelns värde placeras överst i diagrammet etcetera. Ur tornadodiagrammet kan sedan utläsas hur mycket respektive variabel kan påverka resultatet av funktionen, negativt respektive positivt. Att kunna avgöra vilka variabler som har störst inverkan på resultatet ger en möjlighet att koncentrera det fortsatta analysarbetet på rätt faktorer.

5.4 Osäkerhetsanalys

Alla typer av riskvärderingar och riskanalyser innehåller ett antal osäkra parametrar. Att ej ta hänsyn till dessa osäkerheter innebär att resultatets tillförlitlighet ej kan bedömas. För att ta hänsyn till, och kanske framförallt belysa, dessa osäkerheter kan osäkerhetsanalyser genomföras. I en osäkerhetsanalys beskrivs de osäkra parametrarna som fördelningar istället för enstaka deterministiska värden. Osäkerheterna för respektive variabel fortplantar sig sedan genom analysen för att resultera i en total sannolikhetsfördelning. Resultatet kan uttryckas som fördelningen av en funktion eller som konfidensintervall i en riskprofil. I figur 5.1 visas hur osäkerheterna i variablerna X1, X2 och X3, fortplantar sig genom en modell G(X).



Figur 5.1 *Osäkerhetsanalys med hjälp av Monte Carlo-simulering.*

Osäkerhetsanalyser kan antingen utföras på ett enstaka delscenario eller på ett flertal delscenarier i ett händelseträd. Då enstaka delscenarion analyseras kan antingen analytiska eller numeriska metoder användas medan en analys av ett helt händelseträd kräver numeriska metoder. Ett exempel på en analytisk metod är säkerhetsindexmetoden, FOSM, som ej närmare kommer att beskrivas i detta arbete. FOSM beskrivs exempelvis i referenserna [20], [21]. Numeriska metoder kan delas in i enfasmetod och tvåfasmetod. Skillnaden mellan dessa är att enfasmetoden ej skiljer mellan olika typer av osäkerheter medan man med hjälp av en tvåfasmetod kan urskilja vilka osäkerheter som beror på bristande kunskap och vilka som är stokastiska, det vill säga beror på slumpmässiga variationer.

Ett exempel på en numerisk enfasmetod är att använda så kallad Monte Carlo-simulering. Monte-Carlo-simulering kan även användas i en två-fasmetod. I en Monte Carlo-simulering utgås från slumpvis valda värden ur fördelningarna över respektive indatavariabel. Varje kombination av värden används sedan för att beräkna ett värde på variabeln G, se figur 5.1. Detta upprepas sedan exempelvis 1000 gånger vilket resulterar i 1000 värden på variabeln G. På detta sätt erhålls en fördelning av G. I en numerisk analys av enfasmetod representeras osäkerheterna i de ingående variablerna av osäkerheterna av G. Hur en tvåfasmetod används beskrivs exempelvis i referens [22].

Beroende på en riskanalys mål och syfte kan osäkerheterna behandlas på olika sätt. Vilken typ av osäkerheter som bör tas hänsyn till i olika typer av riskanalyser, samt hur detta kan göras diskuteras i kapitel 5.5.

5.5 Osäkerheter i riskanalyser

Ett flertal olika typer av osäkerheter förekommer inom riskanalyser. Några exempel är: osäkerheter i resurser, osäkerheter i antaganden och beslut, osäkerheter i matematiska modeller samt osäkerheter i indata. Med osäkerheter i resurser menas faktorer som kvalité på forskningsresultat, företagspolicy eller andra faktorer som ej är direkt kopplade till ingenjörens förmåga utan istället beror på begränsningar i omgivningen. Osäkerheter i antaganden och beslut innefattar exempelvis de osäkerheter som är kopplade till problem- och måldefinition samt analysavgränsningar. De ovan beskrivna osäkerhetstypernas betydelse för resultatet är mycket svåra att kvantifiera. Osäkerheter i matematiska modeller är osäkerheter som beror på exempelvis förenklingar och antaganden modellerna bygger på. Osäkerheter i indata kan antingen bero på naturliga variationer eller på bristande kunskap. Osäkerheter i matematiska modeller och osäkerheter i indata kan direkt eller indirekt påverkas av de båda förstnämnda osäkerhetstyperna.

I kvantitativa osäkerhetsanalyser behandlas osäkerheter i matematiska modeller och osäkerheter i indata tillsammans. Två olika typer av osäkerheter urskiljs i dessa kvantitativa analyser, vilka båda är en typ av slumpmässiga osäkerheter som kan beskrivas med statistiska fördelningsfunktioner. De två olika typerna är dels naturliga stokastiska osäkerheter, som beror av slumpmässiga variationer i exempelvis väder och vind, och dels kunskapsosäkerheter.

För att kunna ta ett beslut exempelvis angående vilket brandskyddsalternativ som är det bästa i ett visst fall så är det inte alltid nödvändigt att göra en fullständig kvantitativ analys. Ibland kan det räcka att grovt rangordna alternativen medan det i andra fall kan behövas en kvantifiering och uppdelning av olika typer av osäkerheter. Vad som bör ingå i analysen beror på problemets komplexitet samt vilka krav som ställs analysens noggrannhetsnivå. Vilken noggrannhet som krävs beror bland annat på vilken typ av acceptanskrav som finns, vilka beslutsalternativ som finns samt vilka konsekvenser som kan uppstå och med vilken sannolikhet de kan uppstå. I en artikel av Elisabeth Paté-Cornell [23] diskuteras vilka osäkerheter som förekommer i riskanalyser och hur dessa kan hanteras på olika nivåer.

Sex olika nivåer diskuteras i den ovan nämnda artikeln. Den första nivån, ***nivå noll***, behandlar risk- och felmodsidentifiering . Teoretiskt sett kan man använda denna typ av metod för att stödja en noll-visions policy eller för att fatta beslut där kostnaderna är låga och beslutet är klart. Problemet med denna typ av riskanalys är dock att det inte alltid är så självklart vad som är en risk och vad som inte är det. Ibland är risken extremt liten och ibland är det tveksamt om den över huvud taget existerar. Analysen blir på så sätt subjektiv där resultatet blir helt beroende av utförarens sätt att se på saker och ting. Ett exempel på en nivå noll analys är FMEA (Failure Mode and Effect Analyses), vilken är en kvalitativ analys baserad på felträdsmetodik. Med denna metodik kan man finna de svag länkarna i ett system och i viss mån finna hur dessa skall åtgärdas. Negativt är dock att åtgärdernas kostnadseffektivitet ej kan jämföras då man ej har något mått på hur mycket risken sänks med föreslagen åtgärd.

Nivå ett innefattar den typ av riskanalyser där man utgår från värsta tänkbara scenario. Inga sannolikheter är involverade i denna typ av analys och den kan endast komma till användning då ett beslut endast bygger på vad man maximalt riskerar att förlora. Att enbart lita till nivå ett är sällsynt, framförallt eftersom det egentligen inte finns någon gräns för hur illa det kan gå om precis allting felfungerar. Och inte heller finns det ju någon gräns för hur osannolikt det får vara att allting felfungerar.

Nivå två innehåller analyser med ”rimliga övre gränser”. Dessa analyser representerar ett försök att uppskatta den värsta tänkbara konsekvens som är rimligt sannolik när 1) det finns osäkerheter angående vilket det värsta scenariot är eller 2) det värsta scenariot är så osannolikt att det är meningslöst att beakta. I de flesta fall innehåller analyserna inte sannolikheter, gränserna sätts istället med hjälp av historiska data, den övre gränsen kan exempelvis sättas till vad som varit maximalt under de senaste 100 åren. Problemet är att dessa analyser har stora brister om pengarna inte räcker till för att eliminera riskerna eller om man måste prioritera. Bristerna består bland annat av att man inte vet hur konservativ den övre gränsen är och den resterande risken, utöver denna gräns, är därmed okänd. För att bedöma en åtgärds kostnadseffektivitet används ofta dessa rimliga övre gränser som om de vore medelvärden, detta är totalt felaktigt eftersom man inte kan bedöma den övre gränsens rimlighetsgrad i förhållande till en annan övre gräns.

Nivå 3 förlitar sig på dimensionerande scenarion och/eller medel- eller medianvärden av utfallens fördelning. En klassisk metod för att få fram det dimensionerande scenariot är att välja den händelse som verkar mest sannolik och använda sig av de troligaste värdena på parametrarna för denna händelse. Denna metod kan dock leda till att man får ett mest dimensionerande utfall som är att ingenting händer eftersom detta ofta är det mest sannolika. Att helt bortse från att något kan gå fel kan man ju dock inte göra. Medelvärdet har den teoretiska fördelen att vara bäst som bas vid ekonomisk optimering och den nackdelen att det är väldigt känsligt för extremvärden. Medianen är mer stabil men är mindre relevant vid ekonomiska bedömningar. Inte heller dessa analyser ger något annat än ett punktvärde, och även om medelvärdet är beroende av osäkerheterna i utfallet så beskriver det inte osäkerheterna i resultatet på ett tillfredsställande sätt.

Nivå 4 bygger på probabilistiska riskanalyser (PRA), också kallade kvantitativa riskbedömningar (QRA). PRA baseras på rimliga uppskattningar av antaganden och parametrar och ger som resultat en fördelning av sannolikheter av olika systemtillstånd. PRA kan också ge en fullständig fördelning över konsekvensen vilken inkluderar både ”kunskapsosäkerheter” och stokastiska osäkerheter. Effekten av alla osäkerheter samlas i en enda riskkurva vilket gör att det är omöjligt att avgöra om spridningen beror av modellval och antaganden eller om den beror på osäkerheter beroende på slumpfel.

Nivå 5 bygger också på probabilistiska riskanalyser men ger en bild av osäkerheterna på grund av fundamentala antaganden med ett flertal riskkurvor. Detta kan bland annat göras genom att behandla befintlig data statistiskt. Som i nivå fyra så är kunskapsosäkerheter representerade av sannolikhetsfördelningar av de diskreta värdena för alternativa modeller och antaganden. För varje kombination av antaganden representeras effekten av slumpen med hjälp av sannolikheter för vissa villkor. Det sammanlagda resultatet fås genom att kombinera de stokastiska osäkerheterna och modellosäkerheterna. Osäkerheterna följer med och fortplantar sig genom analysen. Detta kan, som beskrivs i kapitel 5.4, göras både analytiskt och med hjälp av Monte Carlo simulering.

De beskrivna nivåerna kan direkt kopplas till de tre olika typerna av acceptanskriterier som beskrivs i BSI-guiden [12] och som diskuterats i kapitel 3.2.3:

1. Probabilistiskt kriterie – kräver analysmetoder på nivå 4 - 5
2. Deterministiskt kriterie: kräver analysmetoder på nivå 2 - 3
3. Jämförande kriterie – jämförelser kan i princip göras på vilken nivå som helst, beroende på problemet komplexitet

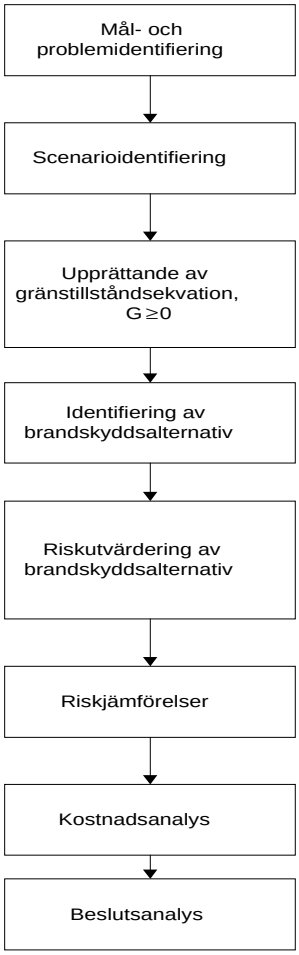
6 Analysmetod för utvärdering av brandskyddsalternativ

I detta kapitel kommer huvudbeståndsdelarna i en metod för riskutvärdering av brandskyddsalternativ eller tekniska byten. Metodbeskrivningen kommer att göras mycket allmänt då tillvägagångssättet kommer att variera mycket beroende på vilka skyddsmål som gäller samt vilken noggrannhetsnivå som krävs.

Metoden skall möjliggöra jämförelser mellan olika typer av brandskyddsalternativ eller tekniska byten. Jämförelser skall kunna ske även mellan passiva och aktiva brandskyddsåtgärder. Metoden skall även kunna användas för att optimera brandskyddet i ett objekt, med avseende på säkerhet och kostnad. Syftet är att metoden skall kunna användas på flertalet typer av byggnader samt att olika krav på noggrannhetsnivå skall kunna tillfredsställas.

6.1 Allmän beskrivning

Metoden består av både deterministiska och probabilistiska analyser. I en probabilistisk analys/delanalys måste osäkerhetsanalyser genomföras där alla osäkra faktorer beaktas. Då höga krav på noggrannhet ställs används probabilistiska metoder i stor utsträckning och det motsatta gäller om noggrannhetskraven ej är så högt ställda. I metodschemat i figur 6.1 presenteras metodens huvudbeståndsdelar, vilka till stor del överensstämmer med de delar som ingår i definitionen av riskhanteringsprocessen enligt IEC [17].



Figur 6.1 *Schematisk beskrivning av metod.*

De i metodschemat ingående delarna kommer att förklaras och beskrivas i de följande delkapitlen. Någon exemplifiering av tillvägagångssätt kommer dock inte att göras här utan följer i kapitel 7 då metoden kommer att användas på ett objekt inom kärnkraftverket Ringhals.

6.2 Mål- och problemidentifiering

I detta delsteg skall mål och syfte med utvärderingen av olika brandskyddsalternativ redovisas.

6.2.1 Förutsättningar och antaganden

De förutsättningar och antaganden som gjorts vad gäller problemstruktur och beräkningsmodeller redovisas. Även eventuella antaganden vad gäller objektets utseende och egenskaper beskrivs.

6.2.2 Objektbeskrivning

Det aktuella objektets innehåll och utseende beskrivs.

6.2.3 Övergripande mål

För att ha bilden klar över vad det är man vill lösa genom att använda metoden är det nödvändigt att ställa upp ett övergripande mål. Är målet att optimera brandskyddet eller är man bara intresserad av vilket av två olika brandskyddslösningar som genererar den högsta säkerhetsnivån? Vid en optimering är det även viktigt att tänka på för vem lösningen skall vara optimal, är det för byggherren eller för den som skall bruka anläggningen eller kanske för entreprenören?

6.2.4 Optimeringsmål

Då en optimering skall göras är det nödvändigt att definiera ett optimeringsmål. Att man vill ha en hög säkerhetsnivå till en låg kostnad är väl ganska självklart, men vad är viktigast säkerheten eller kostnaden? En kvantifiering av hur mycket viktigare säkerheten är än kostnaden eller vice versa bör göras. Detta är givetvis mycket beroende av hur problemet ser ut eftersom någon generell viktning mellan säkerhet och kostnad ej kan göras. Optimeringsmålet måste därför innehålla en definition av minimal säkerhetsnivå och kanske också av maximal kostnadsnivå. När det gäller en byggnad av standardart är det troligt att så fort säkerhetsmålet är uppfyllt så är det optimering av ekonomin som styr. Definitionen av acceptabel säkerhetsnivå kan antingen göras med hjälp av ett acceptabelt maximalt värde på medelrisken eller någon form av acceptabel riskprofil alternativt ett acceptabelt brandskyddsalternativ, det vill säga ett brandskyddsalternativ med vilket en acceptabel säkerhetsnivå antas uppfyllas.

6.2.5 Skyddsmål

Beroende på vilken typ av objekt som analyseras har man olika skyddsmål. Att definiera ett skyddsmål innebär att man beskriver vad begreppet säkerhet innefattar i det aktuella objektet. Är säkerhet lika med att alla människor hinner utrymma innan kritiska förhållanden uppstår eller är det att säkerhetsrelaterade komponenter i ett kärnkraftverk kan upprätthålla sin funktion tills branden är släckt? Vilken typ av skyddsmål som objektet har får en direkt inverkan på fortsatta riskberäkningar.

6.3 Identifiering av brandscenarion

Olika brandskyddsalternativ kan vara känslig mot olika typer av bränder varför flera scenarion bör beaktas. Vilka scenarion som skall analyseras beror exempelvis på ventilationsförhållanden och typ respektive mängd av brandbelastning. Brandscenarierna kan exempelvis identifieras med hjälp av en grovanalys där sannolikheter för och konsekvenser av möjliga scenarier rangordnas. Vilka och hur många scenarier som sedan väljs beror på vilken analysmetodnivå, enligt kapitel 5.5, som problemet kräver. Respektive utvalt scenario tilldelas en viss sannolikhet med vilken det antas inträffa. Ett händelseträd kan upprättas för att beskriva respektive brandscenario. Indata till scenariona kan antingen beskrivas med fasta värden eller med värden beskrivna som sannolikhetsfördelningar. Vilket man väljer beror dels på noggrannhetsnivå men också på om det är praktiskt möjligt att simulera brandförloppet probabilistiskt. Det som krävs för att göra en probabilistisk analys hanterbar är ett regressionsuttryck för den eller de variabler som krävs för att kunna bestämma kritisk tid (se kapitel 7.2.5). Att beskriva sannolikheterna för respektive scenario kräver dock ej detta.

6.4 Utformning av gränstillståndsekvation, G ≥ 0

Gränstillståndsekvationens syfte är att bestämma dels med vilken sannolikhet som det identifierade skyddsmålet ej uppfylls och dels vilka konsekvenser detta då får. Gränstillståndsekvationens ingående variabler beror alltså av skyddsmålet. Om skyddsmålet är säker utrymning bestäms gränstillståndsekvationen enligt rapporten ”Fire Safety Design Based on Calculations: Uncertainty and Safety verification” [24]. Om skyddsmålet istället är att skydda en komponent i ett rum från att felfungera blir motsvarande ekvation:

$$G = K - D - A - S \geq 0$$

där

K = kritisk tid, tid då komponentens yttemperatur uppnått den kritiska

D = detektionstid

A = aktiveringstid, tid från larm till påbörjad släckning

S = släcktid, tid från aktivering till dess att branden är släckt eller tid till dess att komponenten inte längre utsätts för förhöjd temperatur

Att beräkna värdet av G är ett sätt att kvantifiera konsekvensen då gränstillståndsekvationen ej uppfylls. Då gränstillståndsekvationen uppfylls är G istället ett mått på med vilken säkerhetsmarginal som den uppfylls. Parametern G kommer i den fortsatta beskrivningen att benämnas som säkerhetsmarginalen, G.

6.5 Identifiering av brandskyddsalternativ

Med utgångspunkt från objektbeskrivningen kan ett flertal alternativ för hur brandskyddet för objektet kan se ut utformas. Brandskyddet kan bestå av passiva system, det vill säga någon typ av avskiljning, eller aktiva system, såsom sprinkler, eller en kombination av dessa. För att överskådligt visa vilka möjliga kombinationer av brandskyddsåtgärder som kan vara aktuella kan ett beslutsträd upprättas.

6.6 Riskutvärdering av brandskyddsalternativ

Varje brandskyddsalternativ i beslutsträdet skall nu utvärderas med avseende på dess säkerhet vid brand. Då höga krav ställs på resultatets noggrannhet bör ett eller flera av delstegen innefatta osäkerhetsanalyser. Vilka osäkerheter som bör tas hänsyn till i olika typer av problem följer av diskussionen angående osäkerheter i kapitel 5.5. Utvärderingen av brandskyddsalternativen görs i följande delsteg.

1. *Upprättande av händelseträd*
2. *Beräkning av sannolikhet för sluthändelse givet ett visst scenario*
3. *Beräkning av sannolikhet att gränstillståndsekvation ej uppfylls, P(G<0)*
4. *Kvantifiering av konsekvens då gränstillståndsekvationen ej uppfylls*
5. *Beräkning av risk*

I ***delsteg 1*** upprättas för varje brandskyddsalternativ ett händelseträd där alla möjliga delhändelser, brandskyddsåtgärder, presenteras. I händelseträdet anges med vilken sannolikhet som varje delhändelse inträffar, det vill säga med vilken sannolikhet som en viss brandskyddsåtgärd fungerar respektive felfungerar.

I ***delsteg 2*** beräknas sannolikheten för varje sluthändelse i händelseträdet givet ett visst scenario, det vill säga *P(sluthändelse k|scenario i).* Sannolikheten för en sluthändelse är lika med produkten av sannolikheterna för samtliga de delhändelser som leder fram till sluthändelsen. Denna sannolikhet kan antingen beräknas utifrån bestämda felfrekvenser eller, om hänsyn skall tas till osäkerheter, utifrån felfrekvenser beskrivna som fördelningar.

I ***delsteg 3*** görs beräkningen av sannolikheten för att gränstillståndsekvationen ej uppfylls, det vill säga att det uppsatta skyddsmålet ej uppfylls. Sannolikheten för att skyddsmålet ej skall uppfyllas är lika med en specifik sannolikhet för att säkerhetsmarginalen, G, blir mindre än noll, vilket bestäms med hjälp av Monte Carlo simuleringar. Den specifika sannolikheten motsvarar den andel av det totala antalet Monte Carlo simuleringar för vilka resultatet av G beräknats bli mindre än noll, eller *P(G<0| sluthändelse k|scenario i).*

I ***delsteg fyra*** kvantifieras den konsekvens som blir resultatet av att säkerhetsmarginalen, G, blir mindre än noll. Detta görs genom att beräkna exempelvis antalet människor som ej hunnit utrymme innan kritiska förhållanden uppstått. Konsekvensen blir alltså lika med det antal människor som ej hunnit utrymma då G = 0.

I ***delsteg 5*** beräknas den slutliga risken som ett visst brandskyddsalternativ innebär. Detta görs genom att för samtliga scenarion multiplicera den totala sannolikheten för att en konsekvens skall inträffa med den i delsteg 4 kvantifierade konsekvensen. Den totala sannolikheten för ett givet scenario beräknas genom att multiplicera sannolikheten för att en sluthändelse skall inträffa (delsteg 2) med sannolikheten att säkerhetsmarginalen, G, blir mindre än noll (delsteg 3). Matematiskt kan risken beskrivas med följande formel:

$$RISK = \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} P(scenario\, i) \cdot P(sluthändelse\, k) \cdot (P(G<0)) \right) \cdot Konsekvens$$

Den stora skillnaden mellan denna metod och den metod som kallas standard QRA är delsteg 3, där sannolikheten för att skyddsmålet ej uppfylls, givet ett visst utfall, bestäms probabilistiskt.

6.7 Riskjämförelser

Hur det är lämpligt att utföra riskjämförelsen beror framförallt av skyddsmål och konsekvensbeskrivning. För utrymningsscenarion är det lämpligt att förutom medelvärdesjämförelser även jämföra de olika brandskyddsalternativens riskprofiler.

De brandskyddsalternativ som ej uppfyller de uppsatta kraven på säkerhet kan nu sållas bort. Eventuellt kan det med hjälp av tornadodiagram visa sig att ett brandskyddsalternativs låga säkerhetsnivå till stor del beror av någonting som skulle kunna åtgärdas genom att exempelvis förbättra service och kontroll. Det kan då vara lämpligt att införa någon kompletterande åtgärd som åtgärdar detta och sedan genomföra en ny riskvärdering för detta alternativ.

Det är möjligt att olika brandskyddsåtgärder samverkar eller motverkar varandra utan att detta påverkar den beräknade risken, om man har misstankar om att så är fallet bör en särskild analys göras som sedan får vägas in vid jämförelsen av riskerna.

6.8 Kostnadsanalys

För respektive brandskyddsåtgärd beräknas livscykelkostnaden (LCC). I livscykelkostnaden summeras alla kostnader för ett byggprojekt, anskaffningskostnad och framtida kostnader. De framtida kostnaderna nuvärdesberäknas för att ta hänsyn till utvecklingen av penningvärdet. Formeln för LCC har följande utseende [2]:

$$LCC = \sum_{i=0}^{n} \frac{DU_i}{(1+r)^i} + A + \frac{A_v}{(1+r)^n}$$

där

A = Anskaffningskostnad

LCC = Livscykelkostnad

DU_i = Kostnad för drift eller underhåll år i

n = Byggnadens livslängd

r = Real kalkylränta

A_v = Avvecklingskostnad

Kostnadsanalysen beaktar alltså ej förväntade skadekostnader eller eventuella indirekta kostnader som en brand kan orsaka. I de fall då sådana kostnader har en central betydelse bör givetvis dessa beaktas för att en optimering skall kunna ske. Hur hänsyn kan tas till skadekostnader beskrivs exempelvis i referenserna [25], [26].

6.9 Beslutsanalys

Beslutet om vilket brandskyddsalternativ, av de som enligt riskjämförelsen uppfyller säkerhetskraven, som är det optimala tas sedan på grundval av varje brandskyddsalternativs risk samt dess kostnad. Det vill säga att resultaten av riskjämförelserna och kostnadsanalysen sammanvägs. Hur dessa sammanvägs beror på vikten av säkerhet i förhållande till kostnad i det aktuella fallet.

7 Risk- och kostnadsutvärdering av olika brandskyddsalternativ på Ringhals

För att demonstrera användandet av den analysmetod som beskrivits i kapitel 6 presenteras här ett exempel på denna metods användande. Analysmetoden har använts för att göra en probabilistisk riskutvärdering samt en kostnadsanalys av olika typer av brandskyddsalternativ i ett utrymme på kärnkraftverket Ringhals.

7.1 Mål- och problemidentifiering

Utvärderingen av brandskyddsalternativ för ett utrymme inom kärnkraftverket Ringhals kan sägas vara en uppföljning av de PSA och FRA analyser som respektive kärnkraftverk är ålagd att genomföra. Syftet med utvärderingen är att hitta det optimala sättet på vilket det är möjligt att minska ett rums specifika bidrag till en viss skadehändelsefrekvens. Utvärderingens syfte är dessutom att fastställa huruvida det är möjligt att med ett tekniskt byte erhålla en säkerhetsnivå som är acceptabel.

7.1.1 Förutsättningar och allmänna antaganden

Den probabilistiska riskutvärderingen av brandskyddsalternativ görs under förutsättning att brand har uppstått. Sannolikhet för branduppkomst finns alltså inte med i kvantifieringen av risken, vilket gör att de värden som presenteras är relativa och inte absoluta. För att de kvantifierade riskerna skall kunna vara helt jämförbara måste alltså branduppkomstfrekvensen vara helt oberoende av brandskyddsalternativ. Att något sådant beroende finns kan dock inte uteslutas. Det finns i dag ingen utarbetad metod för kvantifiering av respektive alternativs inverkan på branduppkomstsannolikheten. I detta exempel beaktas därför denna påverkan endast kvalitativt genom att det för likvärdiga säkerhetsnivåer bedöms vilket alternativ som har störst potential att sänka branduppkomstsannolikheten.

Det objekt som skall analyseras är ett delvis fiktivt objekt på kärnkraftverket Ringhals. Då höga noggrannhetskrav ställs på kärnkraftverket krävs detsamma för de analyser som skall utföras. Detta medför att riskutvärderingen av brandskyddsalternativ bygger på probabilistiska riskberäkningar, det vill säga att osäkerhetsanalyser ingår. I detta exempel har dock val av scenarion samt utförande av brandförloppssimuleringar skett deterministiskt. Anledningen till detta är att någon probabilistisk brandanalys, som annars bör ligga till grund för dessa parametrar, ännu ej har genomförts på Ringhals och ej heller innefattas av denna utvärdering. Då en metod för probabilistisk brandanalys redan är i användande för utvärdering av brandskyddet på andra kärnkraftverk i Sverige anses det vara av underordnad betydelse att val av scenario samt utförande brandförloppssimuleringar sker deterministiskt i detta exempel. I Appendix D redovisas en kort beskrivning av den probabilistiska brandanalysen samt hur man med utgångspunkt från denna probabilistiskt kan bestämma brandeffekt samt temperaturer i rökgaslager och väggar som funktion av tiden görs.

Med användandet av osäkerhetsanalyser kan alla i beräkningarna ingående osäkra parametrar beskrivas som fördelningsfunktioner. Detta innebär att parametrar inte måste ha ett fixt värde utan kan tillåtas att varieras inom vissa gränser. I fördelningen ingår de värden som parametern kan variera mellan, samt den relativa frekvensen för dessa värden. Eftersom osäkerheter i dokumenterade värden är stora för flera av de parametrar som används är detta

en stor fördel gentemot traditionella analyser där känslighetsanalyser är enda sättet att beskriva de osäkerheter som finns.

Den optimering som görs i denna analys är endast för den enda brandcell som analyseras. Ingen koppling görs till den övriga anläggningen. En optimering av brandskyddet för hela kärnkraftsreaktorn skulle kunna genomföras med hjälp av en sammankoppling av resultatet från flera utvärderingar av denna typ med resultatet från PSA-studien för reaktorn. Om detta görs kan brandskyddet optimeras med avseende på säkerhet och kostnad genom att relatera resultatet av en utvärdering av denna typ till vad som är realistiskt att betala för en sänkning av riskbidraget för det specifika utrymmet från 10^{-4} till 10^{-5} med hänsyn till vad det skulle kosta att göra en motsvarande sänkning i ett annat utrymme.

7.1.2 Övergripande mål

Målet med utvärderingen är att rangordna samt kvantifiera säkerhetsskillnaderna mellan olika brandskyddsalternativ. En deluppgift skall vara att kvantifiera skillnaderna mellan grundkravet för separation mellan redundanta säkerhetssystem angivet i 10 CFR 50 Appendix R [4], det vill säga fysisk separation, och en av de alternativa brandskyddslösningarna som anges, nämligen avståndsseparation i kombination med detektions- och sprinklersystem. Målet är också att göra en enkel optimeringsanalys för det enskilda objektet. Denna skall kunna ligga till grund för en utvidgad syn på vad som är optimalt, se kapitel 7.3.3 nedan.

7.1.3 Skyddsmål

Till skillnad från vanliga byggnader där utrymningssäkerheten är det primära skyddsmålet gäller för kärnkraftverk att funktionen av reaktorsäkerhetsrelaterande komponenter måste säkerställas. I detta exempel består de säkerhetsrelaterade komponenterna av kablar och kablarna antas slås ut då temperaturen i isoleringsmaterialet överstiger 200°C [27]. Val av kritisk temperatur diskuteras i Appendix D. Att förhindra att övertändning inträffar är ett annat skyddsmål då detta kan medföra brandspridning till annat utrymme innehållande säkerhetsrelaterade komponenter. I detta exempel har det aktuella utrymmet dock behandlats helt separat och övertändning har därför endast beaktats som en händelse då samtliga komponenter i utrymmet direkt slås ut. Övertändning antas inträffa då temperaturen i brandgaslagret överstiger 600°C [28].

7.1.4 Optimeringsmål

För att optimera brandskyddet på Ringhals krävs multipla mål. Dels skall brandskyddet innebära en så hög total säkerhet som möjligt och dels skall kostnaden för detta brandskydd vara så låg som möjligt förutsatt att en viss lägsta säkerhetsnivå är uppfylld. Med total säkerhet avses att man måste ta hänsyn till hela kärnkraftanläggningen, det vill säga att möjligheterna att sänka riskbidraget för alla kritiska rum med för högt riskbidrag måste utredas med avseende på kostnad. Då detta exempel endast berör ett enda rum/brandcell kan detta inte göras. I stället antas att den brandcell som analyseras representerar hela anläggningen och att brand är den enda inledande händelse för vilken det finns brister i säkerheten.

Det brandskyddsalternativ som är det mest optimala är det alternativ som ger de högsta säkerhetsnivån i förhållande till kostnad förutsatt att en minsta acceptabel säkerhetsnivå är uppfylld. Som acceptabel säkerhetsnivå har valts den säkerhetsnivå som erhålls med det tekniska byte enligt 10 CFR 50 Appendix R [4] som innebär att fysisk avskiljning ersätts med avståndsseparation samt sprinkler. Detta är alltså inte en verifierad acceptabel säkerhetsnivå

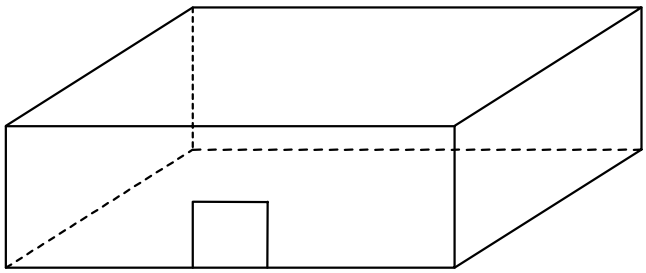
utan endast ett antagande av att man med ett formellt godkänt tekniskt byte erhåller en acceptabel säkerhetsnivå.

7.1.5 Objektbeskrivning

Det objekt som har valts att studeras är delvis fiktivt men representerar den typen av objekt inom Ringhals som är aktuellt att använda metoden på, det vill säga en brandcell som har ett högt bidrag till en allvarlig skadehändelse enligt PSA/FRA och/eller har ett bristande brandskydd jämfört med vad som krävs i 10 CFR 50 Appendix R [4]. Vidare skall det studerade objektet innehålla redundanta säkerhetssystem. Meningen med ovanstående kriterier är att de ska leda fram till ett objekt som ur säkerhetssynpunkt tillhör de som först bör åtgärdas och därför kräver att möjliga åtgärder värderas.

En skiss av den brandcell i vilken metoden skall användas visas i figur 7.1 och har följande egenskaper och innehåll:

- L*B*H = 8*8*4 m
- Brandbelastning: olja i pumpar + eventuell transient brandbelastning
- Väggmaterial: betong
- Golv- och takmaterial: betong
- Brandskyddsklass på omslutande väggar: A60 (EI60)
- Antal dörrar: 1
- Säkerhetskomponenter: kablar
- Ventilation: 30 oms/h, fläkt tål max 70°C [29].



Figur 7.1 *Aktuellt objekt.*

I brandcellen finns två pumpar vilka ej får slås ut samtidigt. Pumparna innehåller olja. Till pumparna går kraftkablar med isoleringsmaterial av PVC som anses vara den svaga komponenten. Avståndet mellan pumparna är 6,2 meter, vilket är det avstånd som enligt 10 CFR 50 Appendix R [4] krävs för avståndsseparering av redundanta system.

7.2 Identifiering av brandscenarion

Identifiering och val av scenarion har i detta exempel skett helt deterministiskt med utgångspunkt från den brandbelastning som kan förväntas finnas i utrymmet. Den brandbelastning som permanent finns i utrymmet är olja i pumparna samt en del kablage, dock ej i sådan mängd att de kan påverka brandförloppet nämnvärt. Dessutom kan det hända att transient (ej permanent) brandbelastning placeras i utrymmet. Denna brandbelastning antas bestå av sopsäckar. Tre brandscenarion har valts som dimensionerande. För samtliga scenarion gäller att ventilationen vid normaldrift är cirka 2 m^3/s. Fläktarna antas dock ej tåla en högre brandgastemperatur än 70°C [29]. Då denna temperatur uppnås antas fläktarna sluta fungera, dock kan luft fortsätta att transporteras genom ventilationssystemet med hjälp av

naturlig konvektion då fläktarna är av sådan art att de släpper genom luft även då de ej är i drift.

Då en probabilistisk brandanalys är utförd för det aktuella utrymmet är delsteget: Val av brandscenarion, redan utfört. Vilka indata som kan erhållas från en probabilistisk brandanalys redovisas i Appendix D.

7.2.1 Scenario 1

En av pumparna i rummet antas läcka olja som sedan antänds. Volymen på oljeutsläppet är 20 liter utbredd på en area av 1,13 m^2. Oljebrandens maximala effektutveckling antas uppnås efter cirka 30 sekunder. Den maximala brandeffekten antas bibehållas i cirka fem minuter varefter effekten antas avta linjärt. Efter 10 minuter antas all olja förbränts. Den maximala effektutvecklingen har i detta scenario beräknats till cirka 960 kW. Beräkningar av brinntid samt maximala effektutveckling redovisas i Appendix D.

7.2.2 Scenario 2

Detta scenario motsvarar en brand i en sopsäck innehållande mestadels plastprodukter samt papper. Sopsäckens placering i rummet varieras vid beräkningarna, dock endast i horisontalled. Den maximala effekten antas vara 350 kW [30] vilken uppnås efter cirka 60 sekunder och bibehålls därefter i ungefär 4 minuter varefter den avtar linjärt. Efter 10 minuter antas branden självslockna på grund av att bränslet är slut.

7.2.3 Scenario 3

Scenario 3 är en kombination av de båda ovanstående scenariona. Branden antas starta i oljan och då den maximala effektutvecklingen uppnåtts antas sopsäcken antändas. Den maximala effektutvecklingen nås efter 90 sekunder och är då 1300 kW.

7.2.4 Scenariosannolikheter

Utvärderingen av brandskyddsalternativen förutsätter att brand uppkommit. Sannolikheten för att något av de tre beskrivna scenarierna skall inträffa är alltså lika med 1. Då en probabilistisk brandanalys ligger till grund för valen av scenarion kan man ur denna även hämta sannolikheter för de valda scenariona. I detta fall baseras sannolikhetsfördelningen för respektive scenario istället på en ingenjörsmässig bedömning. Sannolikheten för scenario1 har tilldelats en likformig sannolikhetsfördelning mellan 0,5 och 0,75, den likformiga sannolikhetsfördelning för scenario 3 varierar mellan 0,01 och 0,05 medan sannolikheten för scenario 2 är lika med sannolikheten för att varken scenario 1 eller scenario 3 inträffar. De beskrivna sannolikhetsfördelningarna kan skrivas enligt följande:

- P(scenario 1) = RiskUniform(0,5;0,75)
- P(scenario 2) = 1-P(scenario1)-P(scenario 3)
- P(scenario 3) = RiskUniform(0,01;0,05)

7.3 Utformning av gränstillståndsekvation, G ≥ 0

Gränstillståndsekvationen vars utseende beror av vilket skyddsmål som identifierats har för detta exempel följande utseende.

$$G = K - D - A - S \geq 0$$

där
K = kritisk tid, tid då komponentens yttemperatur uppnått den kritiska
D = detektionstid
A = aktiveringstid, tid från larm till påbörjad släckning
S = släcktid, tid från aktivering till dess att branden är släckt

Parametern G är den säkerhetsmarginal med vilken en säkerhetsrelaterad komponent klarar sig från att slås ut på grund av branden

7.4 Brandskyddsalternativ

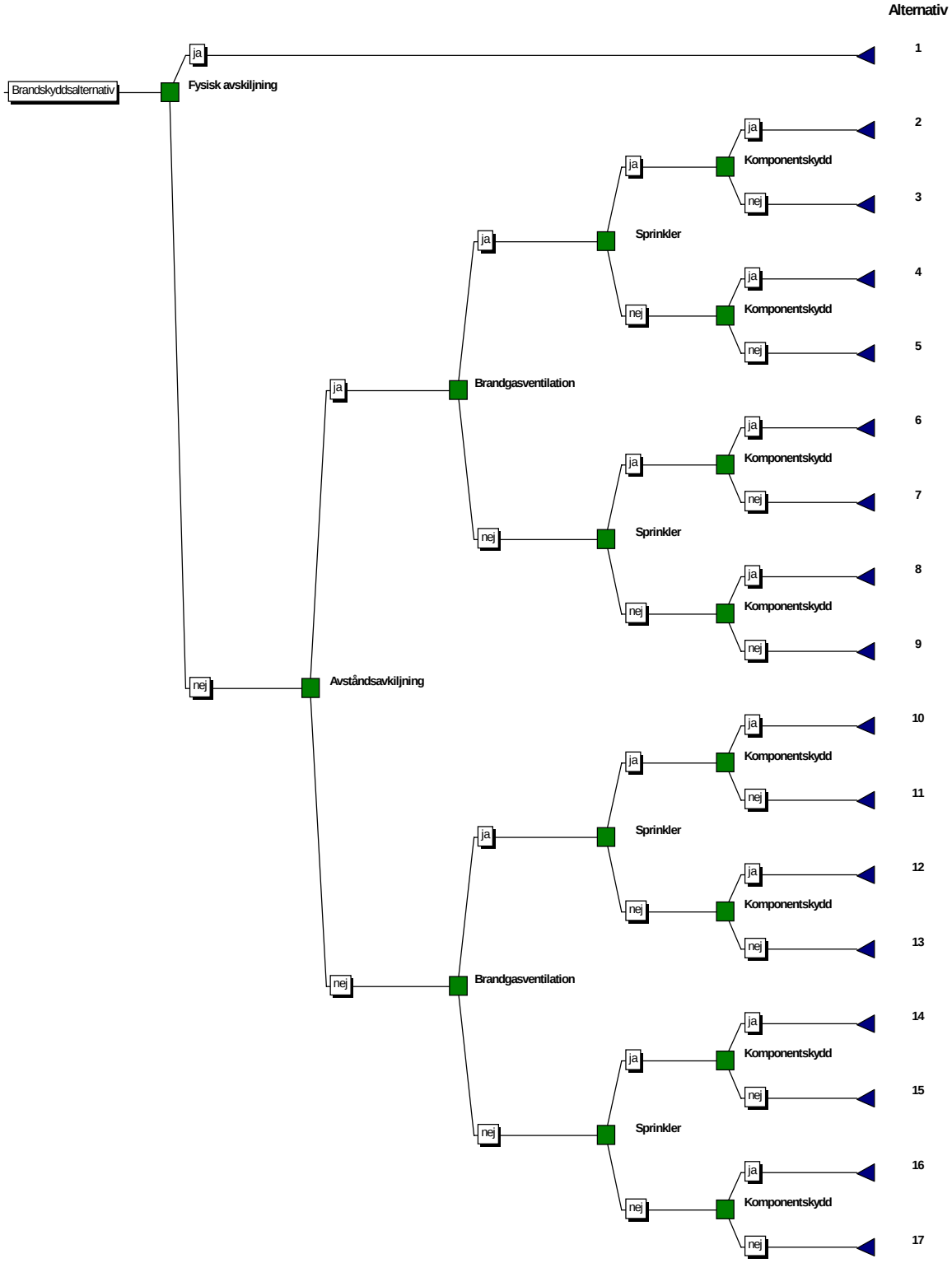
De brandskyddsalternativ som valts att studeras består dels av sådana brandskyddsåtgärder som presenteras i 10 CFR 50 Appendix R [4] men även av brandskyddsåtgärder som på ett eller annat sätt används i kärnkraftverk världen över och som anses ha potential att ge tillräcklig säkerhet vid brand. De brandskyddsåtgärder som ingår i de olika alternativen är, förutom detektion och manuell släckning, följande:

- Fysisk separation
- Avståndsseparering, 6,2 m utan mellanliggande brännbart material
- Brandgasventilation
- Sprinkler
- Komponentskydd/brandskyddsmålning

Förutsättningar och gjorda antaganden för brandskyddsåtgärderna beskrivs i Appendix B. De brandskyddsåtgärder som ingår i Ringhals befintliga brandskydd, och som är gemensamma för samtliga alternativ, finns ej med i beslutsträdet. En sådan brandskyddsåtgärd är automatisk branddetektering som finns i alla rum. Manuell brandsläckning är en annan brandskyddsåtgärd som är gemensam för samtliga brandskyddsalternativ. Med manuell insats avses här endast insats av Ringhals interna brandkår. Anledningen till detta är dels att rummet normalt är obemannat och dels att det är osäkert om, och i så fall hur, manuella insatser av ordinarie personal (ej tillhörande brandstyrka) kan tillgodoräknas. Ringhals interna brandkår har normalt en insatstid på 10 minuter. Denna tid är i många fall för lång för att manuell brandsläckning skall kunna användas för att skydda säkerhetsrelaterad utrustning. Enligt en rapport framtagen i ett projekt angående yttre händelser som kan påverka kärnkraftverk finns dock en metod för beräkning av insatstider beroende på en mängd olika faktorer, som exempelvis antal övningar per år, utrustning, lokalkännedom etcetera [31]. Med hjälp av denna metod kan man räkna sig fram till insatstider på mindre än fem minuter vilket innebär att en manuell insats definitivt kan fungera som en extra brandskyddsåtgärd. Hur tid till manuella insatser har beräknats beskrivs i Appendix B.

I figur 7.2 presenteras alla möjliga kombinationer av brandskyddsåtgärder i ett beslutsträd, se definition i kapitel 4.1. Varje sluthändelse eller utfall i beslutsträdet representerar ett brandskyddsalternativ. Totalt resulterar detta i 17 olika brandskyddsalternativ. Även originallösningen enligt brandskyddsreglerna för kärnkraftverk, det vill säga fysisk separation (alternativ 1 i figur 7.2), finns med som ett alternativ trots att det är just denna lösning som

man vill hitta ett alternativ till. Anledningen till att detta alternativ tagits med är för att se om det tekniska bytet enligt 10 CFR 50 Appendix R [4] som innebär att alternativ 1 i beslutsträdet ersätts med alternativ 7 verkligen genererar en likvärdig säkerhetsnivå.

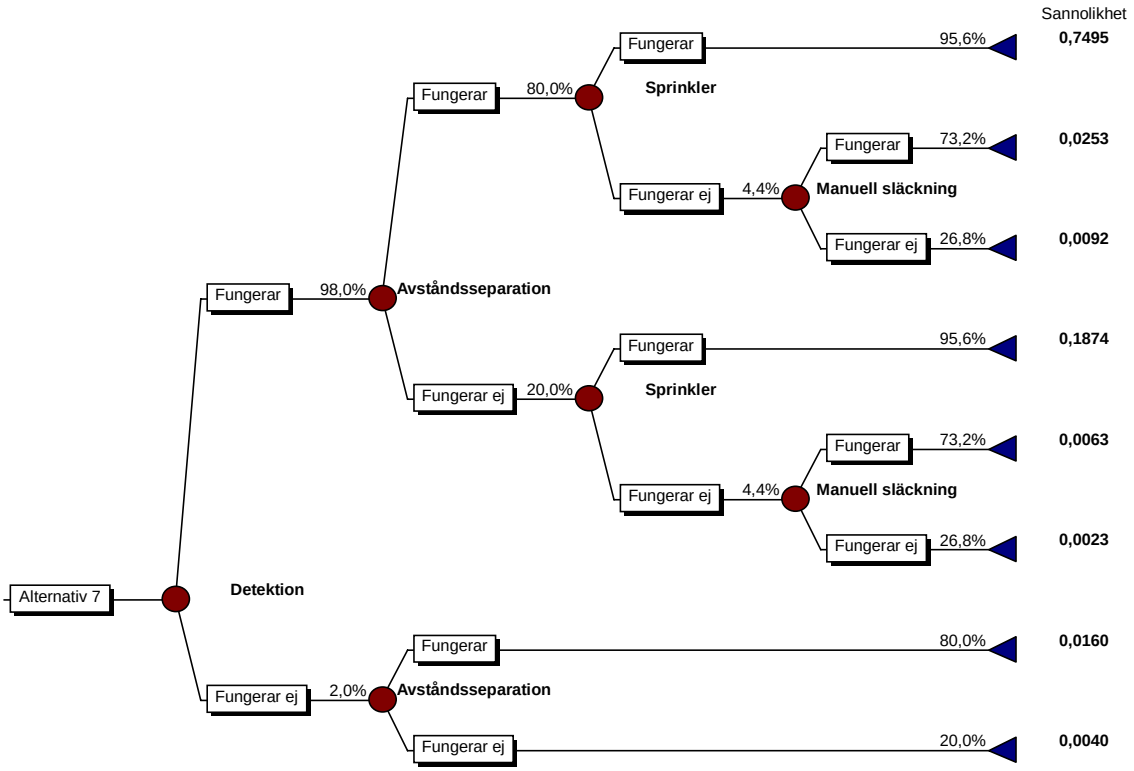


Figur 7.2 *Beslutsträd med brandskyddsalternativ som sluthändelser.*

7.5 Riskvärdering av brandskyddsalternativ

7.5.1 Upprättande av händelseträd

För varje brandskyddsalternativ görs ett händelseträd upp där alla ingående brandskyddsåtgärder presenteras. Varje utfall i respektive händelseträd inträffar med en viss sannolikhet och varje utfall innebär i sin tur en viss sannolikhet för komponentutslagning. Ett exempel på händelseträd ses i figur 7.3 nedan.



Figur 7.3 *Exempel på händelseträd över brandskyddsalternativ.*

De sannolikheter som är angivna i händelseträdet är medelvärdena av de sannolikhetsfördelningarna som använts och som finns redovisade i Appendix D. Händelseträd för respektive brandskyddsalternativ redovisas i Appendix B.

7.5.2 Beräkning av sannolikhet för sluthändelse

Beroende på felfrekvenser för de ingående brandskyddsåtgärderna inträffar ett visst utfall eller sluthändelse i händelseträdet med en viss sannolikhet. Då sannolikheterna för felfunktion för respektive brandskyddsåtgärd är osäkra, beskrivs dessa med hjälp av sannolikhetsfördelningar. Sannolikhetsfördelningarna över felfrekvens används sedan som indata till datorprogrammet @RISK som med hjälp av Monte Carlo-simuleringar ger en total sannolikhetsfördelning för att respektive utfall skall inträffa P(utfall i). Att göra Monte Carlo-simuleringar innebär i korthet att man hämtar slumpvisa värden från de inmatade sannolikhetsfördelningarna över respektive brandskyddsåtgärds felfrekvens $X_1,\ldots X_n$ och beräknar P(utfall i) och upprepar sedan detta exempelvis 1000 gånger. Sannolikheten för ett visst utfall antas vara oberoende av scenario, det vill säga att det är lika sannolikt att exempelvis sprinklersystemet felfungerar om branden har en maximal effekt på 200 kW som om maximal effekt är 2000 KW. Datorprogrammet @RISK beskrivs i Appendix A.

7.5.3 Beräkning av säkerhetsmarginal

Varje sluthändelse i händelseträdet kan för varje scenario kopplas till en viss säkerhetsmarginal för komponentfunktion. Säkerhetsmarginalen för komponentfunktion beräknas enligt den gränstillståndsekvation som presenteras i kapitel 7.4. Variablerna i relationen är stokastiska och beräknas eller bestäms enligt nedanstående beskrivning. Indata till beräkningarna finns i Appendix D. Nedan ges en utförlig beskrivning av tillvägagångssätt samt gjorda antaganden för bestämning av respektive variabel som ingår i formeln för beräkning av säkerhetsmarginal.

Kritisk tid

Den kritiska tiden bestäms genom att simulera ett brandförlopp och sedan beräkna kabelns yttemperatur vid olika tidpunkter. Den kritiska tiden är den tid då kabeln upphör att fungera normalt. Detta antas inträffa då kabelns yttemperatur uppnår 200°C [27]. Den kritiska tiden hade även kunnat definieras exempelvis som den tid då komponenten utsatts för en viss rökpåverkan. I dag är dock bilden av hur olika komponenter påverkas av olika typer av rök oklar. Att rökpåverkan skulle ge en kortare kritisk tid för just detta exempel är dock ytterst osannolikt eftersom de säkerhetsrelaterade komponenterna befinner sig i golvnivå där ingen större rökpåverkan blir aktuell.

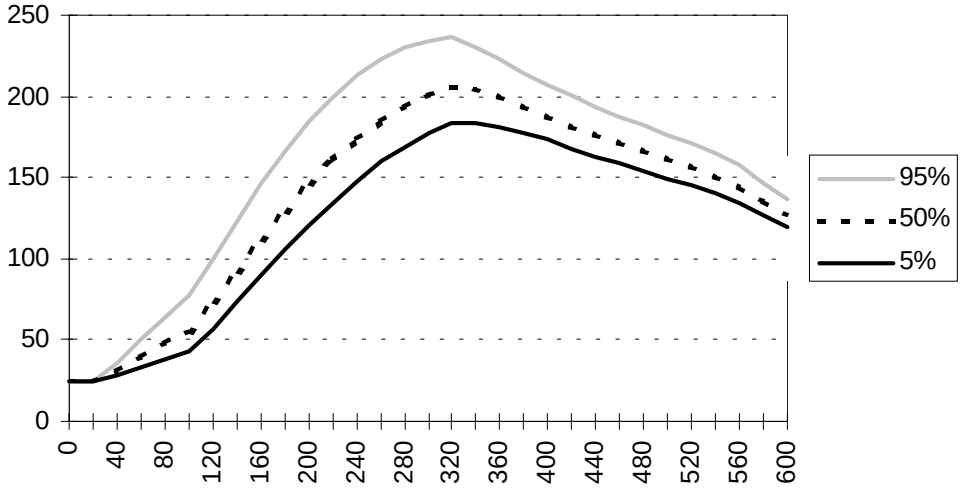
Vid beräkning av den kritiska tiden tas ingen hänsyn till hur en eventuell släckning påverkar uppvärmningen utan kabelns yttemperatur antas öka tills släckningen avslutats. Med långa släcktider är detta antagande konservativt och i dessa fall bör släckningens påverkan utredas separat. I detta exempel är släcktiderna dock korta vilket medför att de konservativa antagande som gjorts ej påverkar det slutliga resultat mer än marginellt.

Simuleringen av brandförlopp sker med hjälp av datorprogrammet CFAST [28]. En beskrivning av detta program redovisas i Appendix A. I detta exempel sker brandförloppssimuleringen deterministiskt, det vill säga att för respektive scenario som valts ut görs för varje brandskyddsalternativ en enda brandförloppssimulering. Ingen analys av osäkra parametrar som påverkar resultatet av brandförloppssimuleringen, exempelvis effektutvecklingshastighet, ingår därmed. Med utgångspunkt från en probabilistisk brandanalys kan resultat från denna i form av utdata från CFAST direkt användas som indata för bestämning av den kritiska tiden, K, se Appendix D.

Den kritiska tiden, K, bestäms med hjälp av ett kalkylblad utarbetat i @RISK (Excel). I kalkylbladet finns formler för strålnings- och värmetransportberäkningar som möjliggör beräkning av en kabelns yttemperatur i olika tidpunkter. De formler som används i kalkylbladet, samt under vilka förutsättningar dessa formler gäller, redovisas i Appendix C.

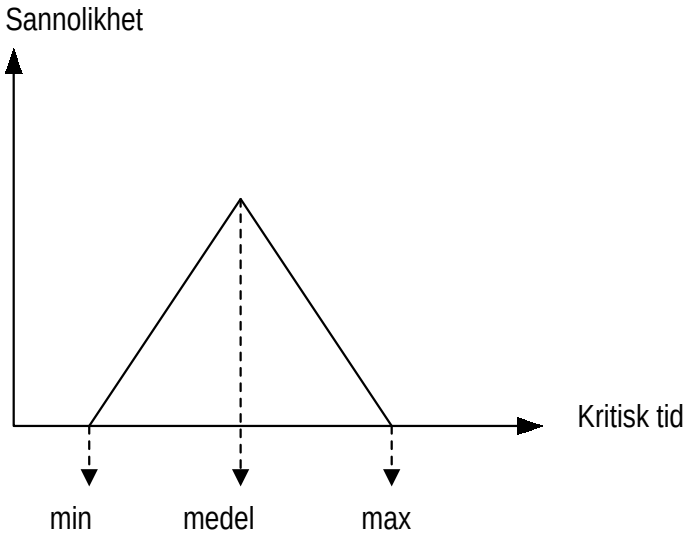
Indata till kalkylbladet består dels av resultat från brandförloppssimuleringarna i form av rökfyllnad, brandeffekt, väggtemperaturer samt temperatur i brandgaslager. Brandgaslagrets höjd samt temperatur korrigeras enligt Lundin [32] genom multiplicering med normalfördelade korrektionsfaktorer. Övriga indata till kalkylbladet är exempelvis flamtemperatur, avstånd mellan flamma och objekt. De indata i kalkylbladet som är osäkra beskrivs som fördelningsfunktioner. De indata som använts för beräkning av yttemperatur med kalkylbladet redovisas i Appendix D.

En sannolikhetsfördelning över yttemperaturen i varje tidssteg erhålls med hjälp av Monte Carlo simuleringar i datorprogrammet @RISK. Simuleringarna resulterar även i att en summagraf kan ritas upp, där yttemperaturen som funktion av tid presenteras dels som medelvärde och dels som 5%- respektive 95%-fraktil, se figur 7.4.



Figur 7.4 Summagraf över yttemperatur som funktion av tid.

5%-fraktilen har i varje punkt en temperatur som understigs i 5% av beräkningarna och motsvarande för 95%-fraktilen är då 95%. Ur summagrafen kan för respektive fraktil utläsas vid vilken tidpunkt som den kritiska temperaturen överskrids. Dessa tidpunkter används sedan för att ta fram en fördelning över den kritiska tiden. Fördelningen approximeras med en triangelfördelning. Den kortaste tiden till kritisk temperatur används då som minvärde, och den längsta som maxvärde. Ett exempel på en triangelfördelning över kritisk tid redovisas i figur 7.5.



Figur 7.5 *Grafisk beskrivning av en triangelfördelning över kritisk tid.*

Beroende på vilket brandskyddsalternativ som analyseras kan ovan beskrivna kalkylblad se något annorlunda ut. Exempelvis innebär brandskyddsåtgärden brandgasventilation att kabeln ej påverkas av någon strålning från rökgaslagret utan enbart av strålning direkt från flamma. Vilka skillnader detta innebär vid val av beräkningsformler och antaganden redovisas även beskrivningen av kalkylblad i Appendix C.

Detektionstid
Detektionstiden beror av tiden till dess att brandgaserna når taknivå samt detektorernas känslighet. Tiden till detektion har bestämts med datorprogrammet DETACT-T2 [33]. Beroende på scenario varierar detektionstiden mellan 20 och 50 sekunder. Sannolikhetsfördelningarna över detektionstid för respektive scenario presenteras i Appendix D.

Aktiveringstid
Aktivering av sprinklersystem skall efter detektion ske manuellt då rädsla finns för de skador som en omotiverad aktivering av släcksystemet kan orsaka. Den manuella aktiveringen antas ta mellan 15 och 30 sekunder. Tid till aktivering av manuell släckning innefattar ett antal delsteg vilka beräknas med utgångspunkt från rapporten ”Metodbeskrivning: Analys av manuella ingrepp vid brand” [31]. De olika delstegen presenteras i händelseträd i Appendix B. Sannolikhetsfördelningar över aktiveringstid och de eventuellt ingående delstegen redovisas i appendix D.

Släcktid
Släcktiden beror av brandscenario. Sannolikhetsfördelningarna över släcktiden har bestämts med utgångspunkt från finska släckförsök [34]. Släcktiderna antas variera mellan 45 och 120 sekunder. Då temperaturen i brandrummet påverkas redan i det ögonblick då släckinsatsen påbörjas kan det vara lämpligt att istället för släcktid använda sig av en parameter som anger tiden till dess att temperaturökningen i rummet upphör. För att bestämma denna tid krävs dock en separat utredning vilket på grund av de relativt korta släcktiderna ej är aktuellt i detta exempel.

7.5.4 Beräkning av sannolikhet för komponentutslagning, P(G<0)
När de stokastiska variablerna i säkerhetsmarginalen har bestämts för ett visst utfall, vid ett visst scenario, kan sannolikheten att G<0 beräknas. Stokastiskt beskrivs gränstillståndet som $G(X_1,\ldots X_n)=0$. Sannolikheten $P(G<0)_{k,i}$ uttrycker sannolikheten för otillfredsställande funktion, dvs att komponenten slås ut, givet scenario k och utfall i. Sannolikheten P(G<0) utvärderas med hjälp av Monte Carlo-simuleringar, som görs i datorprogrammet @RISK. Värdet på P(G<0) beräknas enligt P(G<0) =p/n, där n = totala antalet beräkningar av G och p = det antal fall för vilka G<0.

7.5.5 Kvantifiering av konsekvens
Konsekvenserna av en brand då värdet på säkerhetsmarginalen, G, blir mindre än noll är att den aktuella komponenten förlorar sin funktion. Denna konsekvens erhålls oberoende av hur mycket mindre än noll som säkerhetsmarginalen beräknas bli varför man teoretiskt sett ej kan kvantifiera konsekvensen på annat sätt än med 1 eller 0.

7.5.6 Beräkning av risk

Då konsekvensen är 1 om sannolikheten för komponentutslagning är större än 0 blir risken för komponentutslagning givet ett visst brandskyddsalternativ lika med sannolikheten för komponentutslagning givet ett visst brandskyddsalternativ. Den totala risken för ett visst brandskyddsalternativ beräknas enligt följande:

$$RISK = \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} P(scenario\, i) \cdot P(sluthändelse\, k) \cdot (P(G<0) \right) \cdot Konsekvens$$

7.6 Riskjämförelser

I tabell 7.1 redovisas, för respektive brandskyddsalternativ, risken för att de säkerhetsrelaterade komponenterna i rummet slås ut vid brand. Dessutom redovisas riskförhållandet mellan respektive brandskyddsalternativ och alternativ 17, det vill säga att inget ytterligare brandskydd installeras. Notera att sannolikheten för komponentutslagning gäller givet att brand har uppstått. Det alternativ som ger den lägsta risken står överst i tabellen och så vidare.

Alternativ	Sannolikhet för komponentutslagning	Sannolikhet för komponentutslagning i förhållande till inget brandskydd (alt 17)
1	6,0E-4	1,0E-3
2	7,1E-3	1,3E-2
3	7,3E-3	1,3E-2
6	1,2E-2	2,2E-2
7	1,5E-2	2,7E-2
11	1,8E-2	3,3E-2
10	2,1E-2	3,8E-2
14	3,1E-2	5,6E-2
4	3,6E-2	6,5E-2
15	3,6E-2	6,5E-2
5	4,1E-2	7,4E-2
12	1,4E-1	2,4E-1
13	1,5E-1	2,7E-1
8	1,6E-1	2,9E-1
9	2,1E-1	3,9E-1
16	4,5E-1	8,1E-1
17	5,5E-1	1

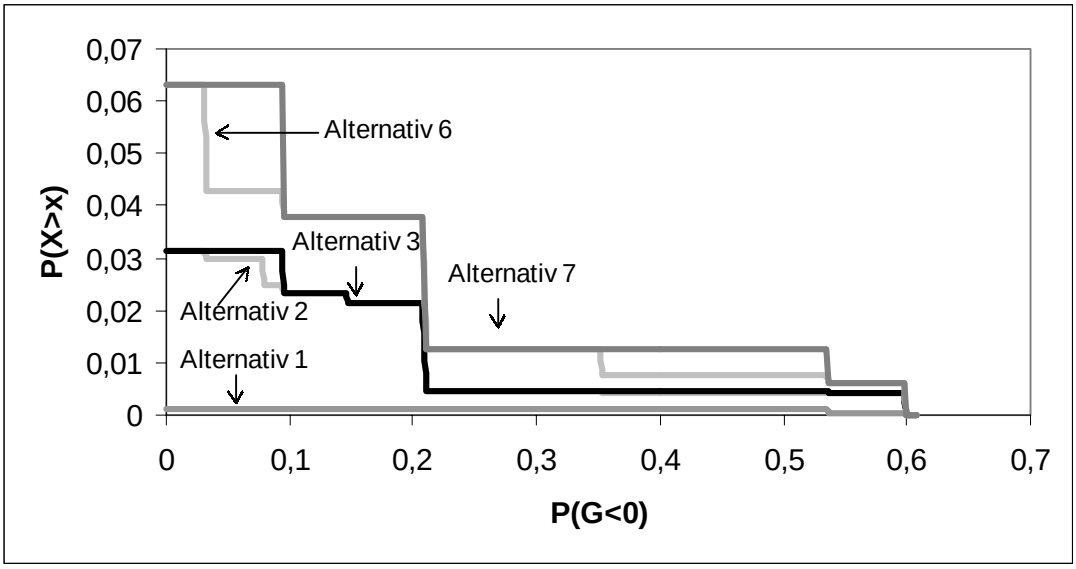
Tabell 7.1 *Sannolikhet för komponentutslagning beroende på brandskyddsalternativ.*

En direkt slutsats som kan dras av resultaten i tabell 7.1 är att brandskyddsalternativet med fysisk separation (alternativ 1) ej kan ersättas av något av de andra alternativen utan att säkerheten minskar. Alternativet avståndsseparation plus sprinklersystem (alternativ 7) som i 10 CFR 50 Appendix R redovisas som ett tekniskt byte till alternativ 1 uppfyller alltså inte kravet om likvärdig säkerhet. Även då ett tekniskt byte är formellt accepterat innebär detta alltså inte att en likvärdig säkerhetsnivå nödvändigtvis erhålls. Vad beror då detta på? I just detta fall är orsaken troligtvis att de aktuella reglerna tillkom då byggnaden redan stod färdig och reaktorerna var i drift. Detta medförde att lösningarna anpassades efter vad som var möjligt att genomföra inom en rimlig tids- och kostnadsram och inte efter vad som skulle generera en optimal säkerhetsnivå. Varför dessa lösningar sedan inte har utvärderats och

reviderats under de över 15 år som gått sedan kraven infördes är svårare att förklara. Det är möjligt att man kommit fram till att kravet på fysisk separation i själva verket är ett överdrivet säkert alternativ och att en lägre säkerhetsnivå kan accepteras. Några sådana slutsatser och vad de i så fall grundats på har dock ej presenterats.

Vid en jämförelse mellan de separata brandskyddsåtgärderna som de olika brandskyddsalternativen i tabell 7.1 innehåller visar det sig att den mest effektiva brandskyddsåtgärden förutom fysisk separation är sprinkler. Alla utom ett av de brandskyddsalternativ som innehåller åtgärden sprinkler ger en lägre risk än de alternativ som ej innehåller sprinkler. Undantaget är alternativ 15 där den enda brandskyddsåtgärden är just sprinkler. Med detta alternativ erhålls en likvärdig risk som med alternativ 4, som innehåller samtliga brandskyddsåtgärder förutom sprinkler. Detta innebär att brandskyddsåtgärderna avståndsseparation, brandgasventilation samt brandskyddsmålning tillsammans genererar en likvärdig säkerhet som brandskyddsåtgärden sprinklersystem. Om man dessutom gör en kvalitativ värdering av inverkan på branduppkomstsannolikheten för dessa båda alternativ så dras slutsatsen att alternativ 4 genererar den lägsta risken av dessa båda alternativ. Detta med motiveringen att både avståndsseparation, i form av videoövervakning av brandbelastning, samt brandskyddsmålning, i form av minskad brandbenägenhet för kabeln, bör generera en minskad branduppkomstsannolikhet medan sprinklersystemet ej påverkar branden förrän den redan uppkommit. Slutsatsen som kan dras av detta är att det med relativs enkla medel kan åstadkommas en säkerhetsnivå som kan jämställas med vad ett sprinklersystem genererar.

Som beskrivits i föregående kapitel är konsekvensen antingen 1 eller 0, det vill säga säkerhetsrelaterade komponenterna slås antingen ut eller inte. Detta omöjliggör upprättandet av en ”traditionell” riskprofil. En alternativ typ av riskprofil kan dock upprättas där konsekvensen beskrivs som en sannolikhet, nämligen sannolikheten att säkerhetsmarginalen blir mindre än noll, det vill säga att de säkerhetsrelaterade komponenterna slås ut. I figur 7.6 presenteras medelriskprofiler för de alternativ som har en lägre medelsannolikhet för komponentutslagning än alternativ 7, det vill säga det alternativ med vilket en acceptabel säkerhetsnivå erhålles enligt optimeringsmålet. Enligt tabell 7.1 gäller detta alternativ 1, 2, 3, 6, samt givetvis alternativ 7.



Figur 7.6 *Riskprofiler för de alternativ som uppfyller antagen acceptabel säkerhetsnivå.*

I Appendix E redovisas osäkerheterna i de genomförda riskberäkningarna genom att riskprofiler med olika sannolikhet att inträffa presenteras. Riskprofilerna är framtagna genom att för tre olika kombinationer av indata rita upp en riskprofil. Skillnaderna mellan två riskprofiler i y-led beror av att riskprofilerna är framtagna genom att använda 5%-, 50% respektive 95%-fraktilen av sannolikheterna för funktion respektive felfunktion av respektive brandskyddsåtgärd i händelseträdet. Skillnaderna i x-led beror på motsvarande sätt av att 5%-, 50% respektive 95%-fraktilen av sannolikheten för att P(G<0) vid sammanslagning av samtliga scenarier är använda. Riskprofilerna i Appendix E har framförallt som syfte att möjliggöra jämförelser mellan de olika alternativens ingående osäkerheter.

7.7 Kostnadsanalys

För respektive brandskyddsåtgärd beräknas livscykelkostnaden (LCC). I livscykelkostnaden summeras alla kostnader för ett byggprojekt, anskaffningskostnad och framtida kostnader. Vilka delkostnader som varje brandskyddsåtgärd består av har tagits fram med hjälp av personal på Ringhals som tidigare medverkat i liknande projekt och kostnaderna gäller därmed för installation i befintligt objekt. De framtida kostnaderna nuvärdesberäknas för att ta hänsyn till utvecklingen av penningvärdet. Formeln för LCC har följande utseende:

$$LCC = \sum_{i=0}^{n} \frac{DU_i}{(1+r)^i} + A$$

där

A = Anskaffningskostnad

LCC = Livscykelkostnad

DU_i = Kostnad för drift eller underhåll år i

n = Byggnadens livslängd

r = Real kalkylränta

Beräkningarna har gjorts med antagande om en inflationen på 2% och en kalkylränta som är 6%. Real kostnadsutveckling för underhåll och drift antas vara 0%. Övriga indata redovisas i Appendix D. Kostnaderna är framtagna specifikt för Ringhals utifrån historiska data. I tabell 7.2 redovisas livscykelkostnaden, LCC, för respektive brandskyddsåtgärd. Den livscykelkostnad som anges för brandskyddsåtgärden fysisk avskiljning motsvarar enbart de kostnader som har med själva byggnationen av väggen att göra, det vill säga att inga kostnader som indirekt orsakas av den fysiska avskiljningen har beaktats.

Brandskyddsåtgärd	**LCC [kkr]**
Fysisk avskiljning	155
Brandgasventilation	87
Sprinklersystem	323
Brandskyddsmålning	18
Avståndsavskiljning / Övervakningskamera	78

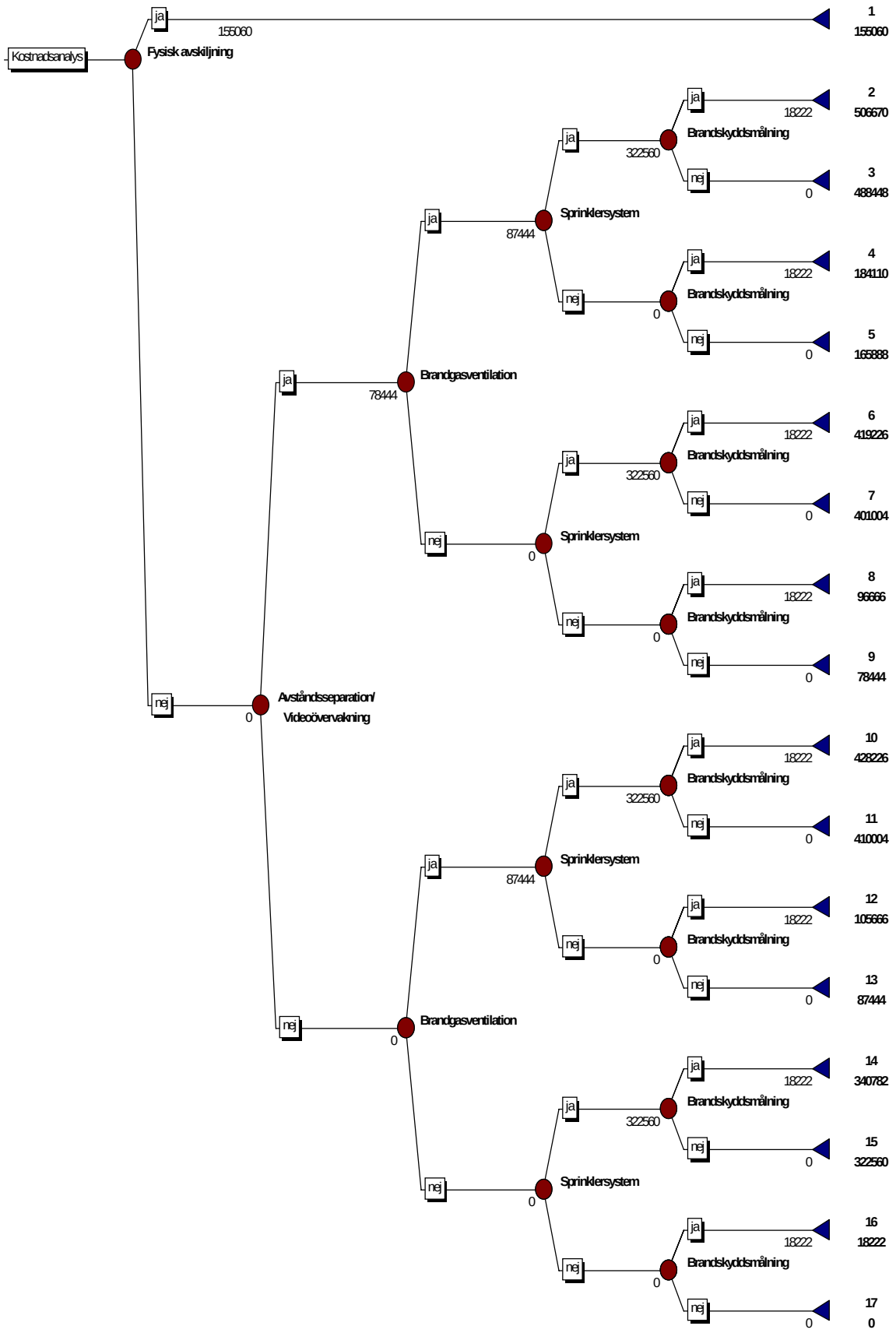
Tabell 7.2 *Livscykelkostnad för respektive brandskyddsåtgärd*

I tabell 7.3 redovisas den totala livscykelkostnaden för alternativ 1 till och med 17.

Alternativ	Livscykelkostnad, LCC [kkr]
1	155
2	507
3	488
4	184
5	166
6	419
7	401
8	97
9	78
10	428
11	410
12	106
13	87
14	341
15	323
16	18
17	0

Tabell 7.3 *Livscykelkostnad för respektive brandskyddsalternativ.*

I figur 7.7 redovisas livscykelkostnaderna för respektive brandskyddsalternativ samt för de ingående brandskyddsåtgärderna i form av ett beslutsträd.

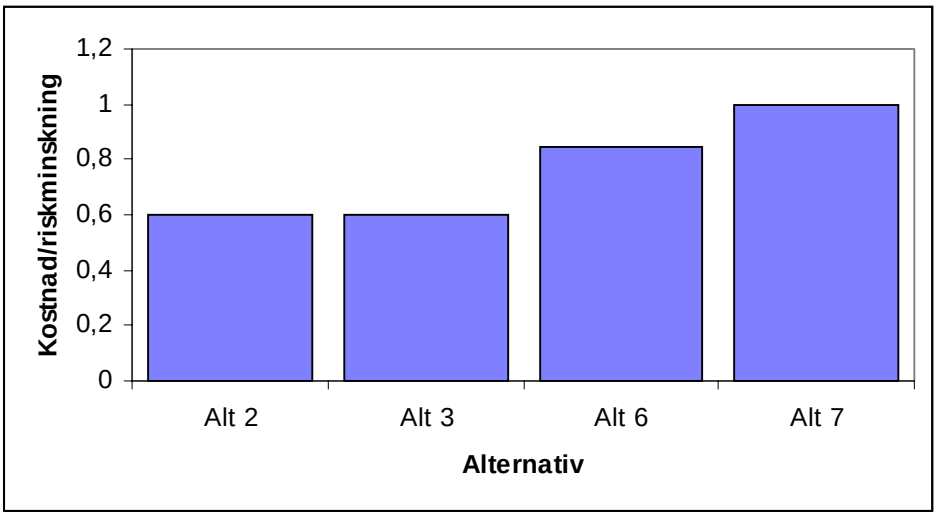


Figur 7.7 *Beslutsträd med livscykelkostnader.*

7.8 Beslutsanalys

Beslutet om vilket brandskyddsalternativ som är det optimala tas på grundval av den bestämda medelsannolikheten för utslagning av redundant system samt kostnad. Förutsatt att en viss säkerhetsnivå är uppfylld väljs det brandskyddsalternativ som kostnadsmässigt är det mest effektiva. Som beskrivits i optimeringsmålet så antas den säkerhetsnivå som erhålls med brandskyddsalternativ nummer sju vara den minimalt acceptabla. Med bakgrund av de stora skillnaderna i säkerhetsnivå mellan detta alternativ och alternativet fysisk separation så kanske detta bör omvärderas och ytterligare alternativ utvärderas för att komma närmare den säkerhetsnivå som fysisk separation genererar. Då alternativet med avståndsseparation och sprinklersystem ändock har varit och är en godkänd lösning så görs dock inte detta här utan den antagna acceptabla säkerhetsnivån bibehålls. Brandskyddsalternativet fysisk separation finns ej med i beslutsanalysen då detta alternativ är anledningen till att ett tekniskt byte är nödvändigt och alltså ej anses vara genomförbart och då heller inget beslutsalternativ.

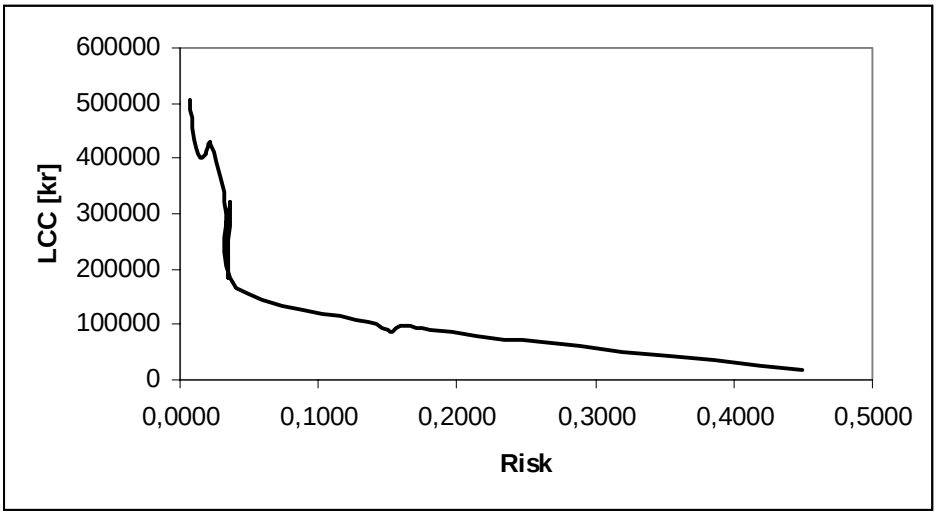
För de brandskyddsalternativ som enligt kapitel 7.7 uppfyller den antagna acceptabla säkerhetsnivån presenteras i figur 7.8 den relativa kostnaden i förhållande till riskminskning. Kostnad och riskminskning har i denna värdering givits samma vikt. Det vill säga att det är lika viktigt att säkerheten blir hög som att kostnaden blir låg.



Figur 7.8 *Relativ kostnad i förhållande till erhållen riskminskning.*

Enligt ovanstående diagram är alternativ 2 och 3 de mest optimala alternativen. Alternativ 3 består av brandskyddsåtgärderna avståndsseparation, brandgasventilation samt sprinklersystem. Alternativ 2 består förutom av dessa åtgärder även av brandskyddsmålning. Övriga 12 alternativ är enligt det antagna acceptanskriteriet oacceptabla, bland dem återfinns bland annat alternativet som bara innefattar brandskyddsåtgärden sprinkler. Att enbart använda sig av ett sprinklersystem som brandskyddsåtgärd visar sig alltså i detta exempel inte vara en tillräcklig åtgärd och vid en kostnadsjämförelse med ett annat alternativ som ger minst en likvärdig säkerhetsnivå (alternativ 4) visar det sig att livscykelkostnaden för sprinklerlösningen är 1,8 gånger så dyr som alternativ 4. Sprinkler hade alltså inte varit någon optimal lösning även om säkerhetsnivån varit tillräcklig.

I figur 7.9 visas livscykelkostnaden som funktion av risken. Ur denna kan man utläsa att det kostar att skapa en hög säkerhetsnivå men att kostnaderna ökar ganska långsamt upp till en viss säkerhetsnivå. När sedan en ytterligare höjning av säkerhetsnivån skall åstadkommas ökar kostnaderna kraftigt. Brytpunkten i diagrammet representeras av kostnaden för sprinklersystem.



Figur 7.9 *Livscykelkostnad i förhållande till erhållen risk.*

8 Utvärdering av metod

Målet med den metod för värdering av tekniska byten, eller brandskyddsalternativ, som beskrivs i kapitel sex och exemplifieras i kapitel sju, är att den skall möjliggöra jämförelser mellan olika brandskyddsalternativ, passiva som aktiva, samt att möjliggöra en optimering av brandskyddet med avseende på säkerhet och kostnad. Av exemplifieringen på ett objekt inom kärnkraftsindustrin i kapitel sju kan utläsas att det med hjälp av metoden är möjligt att göra detta. Dock är kvalitén på metodens resultat starkt beroende av vilka antaganden som görs och vilka indataosäkerheter som finns. Detta gäller även då osäkerhetsanalyser genomförs eftersom osäkerheter i form av osäkerheter i tillgängliga forskningsresultat och osäkerheter i antaganden ej har kunnat kvantifierats. Det är av mycket stor vikt att känslighetsanalyser utförs kontinuerligt i processen för att resultatet skall få högsta möjliga tillförlitlighet.

Den metodbeskrivning som görs i kapitel sex är för att möjliggöra användandet av metoden även inom andra områden än kärnkraftsindustrin mycket allmän. Detta medför att en tillämpning av metoden på ett utrymningssäkerhetsproblem, vilket inte behandlats i denna rapport, kräver en stor arbetsinsats för att anpassa metoden till det aktuella problemet.

Metoden kan tyckas vara mycket tidskrävande, speciellt om problemet är ett annat än det som exemplifierats här. Den tidsåtgång som krävs i initialskedet kan dock ses som en investering för framtiden eftersom ett kontinuerligt användande av metoden möjliggör en avsevärd minskning av tidsåtgången. I ett längre perspektiv kan därmed metoden vara ett konkurrenskraftigt alternativ till deterministiska metoder för att exempelvis skapa argument för ett tekniskt byte eller alternativ utformning.

Problemet med bristande acceptanskriterier, som ofta framförs som argument för att ej genomföra riskbaserade analyser av ett tekniskt byte, kan kringgås genom att jämföra risken för den aktuella lösningen med risken för den ordinarie lösning som skall ersättas. Detta har givetvis en stor svaghet då det förutsätter att den ursprungliga lösningen genererar en acceptabel säkerhetsnivå. Jämfört med dagens deterministiska analyser för att utvärdera tekniska byten är detta dock ett stort steg i rätt riktning.

9 Diskussion och slutsats

Utifrån resultatet av detta arbete har bland annat nedanstående slutsatser, vad gäller möjligheterna att göra riskbaserade jämförelser mellan olika brandskyddsalternativ, kunnat dras:

- Brandskyddsprojektering vid nybyggnad bör genomföras genom att utgå från de övergripande målen för brandsäkerheten och inte genom att lösa olika detaljproblem.
- För att inte förlora helhetssynen i brandskyddsdimensioneringen är det nödvändigt att någon form av riskbedömning av hela byggnaden genomförs.
- En alternativ lösnings tillförlitlighet måste beaktas vid dimensionering.
- En värdering av en alternativ lösnings inverkan på det övriga brandskyddet krävs för att se att olika brandskyddsåtgärder ej motverkar varandra.
- En komplettering av byggreglerna med råd eller regler för vad som ska ingå i en analys av en brandskyddslösning, förutom generella krav som ”visas genom beräkning eller provning”, skulle kunna bidra till ett ökat helhetstänkande.
- Det är fullt möjligt att verifiera huruvida ett tekniskt byte uppfyller en viss säkerhetsnivå eller inte samt att jämföra olika brandskyddsalternativ även om dessa innehåller både passiva och aktiva skyddssystem.
- För att kunna fastställa och jämföra en säkerhetsnivå som genereras av olika brandskyddslösningar är det nödvändigt att ta hänsyn till felfrekvenser, framförallt då aktiva system jämförs med passiva.
- Generella acceptanskriterier är inte nödvändiga för att en riskvärdering skall vara meningsfull, men de skulle underlätta.
- Att välja första bästa alternativ och genomföra det så billigt som möjligt ger ej ett optimalt brandskydd, varken med tanke på säkerhet eller kostnad.
- Vid en brandskyddsoptimering är det viktigt att definiera för vem som optimeringen skall ske.
- Tekniska byten som redovisas i råd eller regler uppfyller nödvändigtvis inte samma säkerhetsnivå som det ursprungliga kravet. Detta bör klart framgå och specifika krav på verifiering av säkerhetsnivå bör ställas.
- De alternativa brandskyddslösningarna som presenteras i 10 CFR 50 Appendix R generar bevisligen ej alltid en likvärdig säkerhetsnivå.
- Om man i ett funktionsbaserat regelverk för brandskydd i kärnkraftverk utgår från de alternativa lösningarna i 10 CFR 50 Appendix R, utan att komplettera med förtydligande angående vad som är acceptabelt i olika situationer, kommer detta ej att underlätta användandet av andra lösningar än de som anges.
- Att installera sprinklersystem eller andra fasta släcksystem är ej en universallösning som alltid uppfyller acceptabel säkerhetsnivå.

Grunden för att den presenterade metoden skall generera rättvisande och trovärdiga resultat är att en mycket bra bas av indata finns att tillgå. Detta är ett problem som måste åtgärdas, framförallt genom att bättre dokumentera inträffade händelser, för att framtidens byggnader skall kunna bli säkrare och kanske framförallt för att säkerhetsskillnaderna i olika byggnader skall kunna utjämnas.

Referenser

[1] *Boverkets byggregler 1999*, BFS 1993:57 med ändringar tom BFS 1998:38, Boverket, Karlskrona, 1998.

[2] *Utvärdering av ändringar i byggregleringen; Brand*. Rapport 1997:9, Boverket, Karlskrona, 1997.

[3] SBN 1980, *Svensk Byggnorm*. Statens planverks författningssamling, PFS 1980:1 Liber Tryck, Stockholm, 1980

[4] 10 CFR 50 Appendix R, *Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979*. Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, Washington, 1987.

[5] NR, *Nybyggnadsregler*. BFS 1988:18, Boverket, Karlskrona, 1989.

[6] RUS 120:4, *Regler för automatisk vattensprinkleranläggning*. Försäkrings förbundet, Stockholm, 1993.

[7] PBL, *Plan- och Bygglagen*. PBL 1987:10, omtryck SFS 1992:1796, Boverket, Karlskrona, 1995.

[8] BVL, *Lagen om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk m.m.*, SFS 1994:847, Boverket, Karlskrona, 1994.

[9] BVF, *Byggnadsverksförordningen*. 1994:1215, Boverket, Karlskrona, 1994.

[10] BKR 94, *Boverkets konstruktionsregler*. BFS 1993:58, Boverket, Karlskrona, 1994.

[11] Deakin, G., Cooke, G., Future codes for fire safety design. *Fire Safety Journal*, Vol. 23, No. 2, pp 193-219, 1994.

[12] BSI Draft for development DD 240: *Fire safety engineering in buildings. Part 1: Guide to the application of fire safety engineering principles*. British Standards Institution, London, 1997.

[13] Krasner, *Water as a means of cable fire protection and operational effects experience*, Electric Power Research Institute, EPRI NP-1193, Palo Alto, CA, 1979

[14] *Fire Protection in Nuclear Power Plants, A Safety Guide*, Safety Series No. 50-SG-D2 (Rev.1), IAEA, 1992.

[15] Klein, G.A., Orasanu, J., Calderwood, R., Zsambok, C.E., *Decision making in action: models and methods*, Ablex publishing Corp. Norwood, 1993.

[16] Clemen, R., *Making hard decisions, an introduction to decision analysis* , Duxbury Press, California, 1996.

[17] International Electrotechnical Commission (IEC), *International Standard 60300-3-9, Dependability management – Part 3: Application guide – section 9: Risk analysis of technological systems*, Genéve, 1995.

[18] Hadjisophocleous, G.V., Benichou, N., Tamim, A.S.,Literature Review of Performance-Based Fire Codes and Design Enviroment. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp 20-37, 1998.

[19] Fraser-Mitchell, J.N., *Synthesis of Deterministic and Probabilistic methods*, 2nd International Conference on Fire and Explosion Protection, Zürich, 1998.

[20] Hasofer, A.M., Lind, N.C. An Excact and Invariant First Order Reliability Format. *Proc. ASCE, J Eng. Mech. Div.* 1974.

[21] Thoft-Christensen, P., Baker, M.J. *Structural Reliability and Its Applications.* Springer Verlag, Berlin, 1982.

[22] Frantzich, H., *Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering*. Rapport 1016. Institutionen för Brandteknik, Lunds Universistet, Lund, 1998.

[23] Paté-Cornell, E., Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering and System Safety 54* (1996) pp 95-111, 1996.

[24] Magnusson, S.E., Frantzich, H., Harada, K., Fire Safety Design Based on Calculations: Uncertainty Analysis and Safety Verification, *Fire Safety Journal Vol. 27*, pp 305-334, 1997.

[25] Johansson, H., "Ekonomisk riskanalys av ABB Automation Products verksamhet i byggnad 358", Report 3102, 1999.

[26] Johansson, H., " Ekonomisk riskanalys av Avesta Sheffields kallvalsverk i Nyby ", Report 3103, 1999.

[27] Gilles, Barachin, et. al., *Results and insights of the Fire PSA on the French 900 MWe nuclear power plant*, Proc. of PSAM 4, Vol. 1, pp 692-697, 1998.

[28] Peacock, R.D., Jones, W.W., Forney, G.G., Portier, R.W., Reneke, P.A., Bukowski, R.W., Klotke, J.H., An Update Guide for HAZARD I, Version 1.2, NISTIR 5410, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1998.

[29] Jörud, F., *Fire Modelling pump room 074*, Sydkraft Konsult, Malmö, 1998.

[30] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, First Edition, National Fire Protection Association, Quincy, 1988.

[31] Holmgren, P., *Metodbeskrivning: Analys av manuella ingrepp vid brand*, RELCON-95133/003, Stockholm, 1996.

[32] Lundin, J., *Uncertainty in smoke transport models*, Rapport 3086, Institutionen för Brandteknik, Lunds Universitet, Lund, 1997.

[33] Evans, D.D., Stroup, D.W., *Methods of Calculating the Response Time of Heat and Smoke Detectors Installed below Large Unobstructed Ceilings*. NBSIR 85-3167, National Buereau of Standards, Gaithersburg, 1985.

[34] Willberg, L.E., Norta, A.K., *Sprinkler Protection of Oil Filled Equipment in Finnish Nuclear Power Plants*. IAEA Symposium on Fire protection and Fire Fighting in Nuclear Installations, Vienna, 1989.

[35] *Guide to using @RISK*, Palisade Corporation, Newfield, 1997.

[36] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models*, Safety Series No. 100, Vienna 1989.

[37] *User's guide PRECISION TREE*. Palisade Corporation, Newfield, 1997.

[38] Magnusson, T., *Diskussion angående circuit integrity / brandskyddsfärger / massor*. Vattenfall AB Ringhals, 1998.

[39] Quintiere, J.G, Karlsson, B., *Enclosure Fire Dynamics, a first draft of a student handbook.* Institutionen för Brandteknik, Lunds Universitet, Lund, 1997.

[40] Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, Wiley, New York, 1985.

[41] Isaksson, S., *Litteraturstudie angående brandskydd i kärnkraftverk, del 2: Branddetektionssystem och släcksystem*, SKI Rapport 96:1, Stockholm, 1996.

[42] Agner, A., *Realistisk Modellering av Brandförlopp*, ES-konsult, Stockholm, 1996.

[43] Guymer, P., Parry, G.W., *Use of probabilistic methods in fire hazard analysis*, IAEA-SM-305/1, Vienna, 1989.

[44] *Automatic and Manual Suppression Reliability Data for Nuclear Power Plant Fire Risk Analyses*, NSAC 179L, EPRI, Los Altos, 1994.

[45] Steciak, J., Zaosh, R.G., A reliability methodology applied to Halon 1301 extinguishing systems in computer rooms , Fire Hazard and Fire Risk Assessment, ASTM STP, pp. 162-182, Philadelphia, 1992.

Appendix A

Beskrivning av programvara

Innehållsförteckning:

A.1 CFAST 67

A.2 @RISK 67

A.3 PRECISION TREE 67

A.1 CFAST

CFAST är en brandtillväxtmodell för analyser av bränder i flera rum som ingår i programpaketet HAZARD I v. 1.2. HAZARD I är framtaget av National Institute for Standards and Technology (NIST) [28].

CFAST är en zonmodell vilket innebär att man förutsätter att det vid brand i rummet bildas två lager (zoner), ett övre varmt och ett undre kallt. I respektive lager antas gastemperatur och densitet vara konstanta. Temperaturförändringar och ändringar i rökgaslagret simuleras genom att för varje tidssteg beräkna ändringen av massa och energi mellan zonerna.

Indata till CFAST utgörs av geometriska faktorer, ventilationsförhållanden, effektutveckling, samt materialspecifikationer. Bland annat följande parametrar kan bestämmas med hjälp av simulering med CFAST:

- Brandgasspridning
- Temperatur
- Siktförhållanden
- CO/CO2-produktion
- Inverkan av mekanisk ventilation

A.2 @RISK

Programvaran @RISK [35] är ett tillägg till EXCEL framtaget av Palisade Corp. Programmet möjliggör en behandling av indata som statistiska fördelningar istället för punktvärde. Detta medför att probabilistiska analyser kan utföras på ett snabbt och effektivt sätt. I programmet finns ett stort antal standardiserade fördelningsfunktioner att tillgå. Resultatet kan erhållas genom numeriska beräkningar med hjälp av två olika samplingsmetoder; Latin Hybercupe [36] eller Monte Carlo. Resultatet består av bland annat täthetsfunktion, fördelningsfunktion samt läges- och spridningsmått. Presentation av resultaten kan ske både grafiskt och i tabellform.

A.3 PRECISION TREE

PRECISION TREE [37] är ett tillägg till EXCEL framtaget av Palisade Corp. Programmet möjliggör att på ett enkelt sätt rita upp och utvärdera beslutsträd respektive influensdiagram. Indata kan utgöras av beroendeförhållanden mellan parametrar, besluts- och osäkerhetsnoder, utfall samt sannolikheter. Resultat redovisas både grafiskt och i tabellform och kan utgöras av det mest optimala alternativet, riskprofiler, förväntade utfall samt sannolikheter för respektive utfall.

Programmet kan förutom ovanstående även utföra deterministiska känslighetsanalyser för en eller flera parametrar samt länkas till @RISK för utförande av probabilistiska känslighetsanalyser.

Appendix B

Brandskyddsalternativ

Innehållsförteckning:

B.1 BRANDSKYDDSÅTGÄRDER 73

B.1.1 FYSISK SEPARATION 73
B.1.2 AVSTÅNDSSEPARATION 73
B.1.3 SPRINKLER 73
B.1.4 BRANDGASVENTILATION 73
B.1.5 SKYDD AV KOMPONENTER 73

B.2 MANUELL SLÄCKNING 74

B.3 HÄNDELSETRÄD ÖVER BRANDSKYDDSALTERNATIV 75

B.3.1 ALTERNATIV 1 75
B.3.2 ALTERNATIV 2 76
B.3.3 ALTERNATIV 3 77
B.3.4 ALTERNATIV 4 78
B.3.5 ALTERNATIV 5 79
B.3.7 ALTERNATIV 7 81
B.3.8 ALTERNATIV 8 82
B.3.9 ALTERNATIV 9 83
B.3.10 ALTERNATIV 10 84
B.3.11 ALTERNATIV 11 85
B.3.12 ALTERNATIV 12 85
B.3.13 ALTERNATIV 13 86
B.3.14 ALTERNATIV 14 86
B.3.15 ALTERNATIV 15 87
B.3.16 ALTERNATIV 16 87
B.3.17 ALTERNATIV 17 87

B.1 Brandskyddsåtgärder

Nedan följer en kort presentation av de förutsättningar och antaganden för de brandskyddsåtgärder som presenteras i Figur 7.1. Om ej annat anges så bestäms respektive brandskyddsåtgärds påverkan på säkerhetsmarginalen, G, genom att resultaten från respektive brandförloppssimulering, med hjälp av CFAST, används som indata för beräkning av komponentens yttemperatur vid olika tidssteg.

B.1.1 Fysisk separation

I 10 CFR 50 Appendix R [4] står att man skall ha en tre timmars avskiljande vägg mellan redundanta system. Fysisk avskiljning i svenska kärnkraftverk består framförallt av väggar klassade EI 60 varför det är denna typ av avskiljning som är aktuell att analysera. Även detta alternativ innehåller dock svagheter, exempelvis kan det finnas en dörr i väggen som inte är tät eller som står öppen. Vad dessa svagheter innebär för skyddet av det redundanta systemet kommer att analyseras genom att göra brandförloppssimuleringar med dessa förutsättningar som indata.

B.1.2 Avståndsseparation

Med avståndsseparation menas att två redundanta system är placerade minst 6,2 meter från varandra utan mellanliggande brandbelastning. Anledningen till att just avståndet 6,2 meter används är att det är detta avstånd som rekommenderas i 10 CFR i Appendix R [4]. För att det skall kunna säkerställas att ingen brandbelastning finns placerad mellan de redundanta systemen krävs någon form av kontinuerlig övervakning. Kontinuerlig övervakning anses i detta exempel kunna erhållas med hjälp av en övervakningskamera.

B.1.3 Sprinkler

Det sprinklersystem som analyseras antas vara dimensionerat för att släcka den dimensionerande branden (exempelvis kan detta ske med hjälp av provning), för att på så vis skydda den säkerhetsrelaterade komponenten. För att undvika felaktig aktivering av sprinklerhuvuden aktiveras dessa manuellt genom att vakt skall konstatera brand innan systemet aktiveras.

B.1.4 Brandgasventilation

Installation av brandgasventilation dimensionerat efter den dimensionerande branden motverkar att ett rökgaslager bildas i rummet. Ingen uppvärmning av väggar sker då heller varför ingen strålning från varken rökgaslager eller väggar påverkar komponenten. Den enda strålningen som medverkar till en höjning av komponentens yttemperatur är då strålningen direkt från flamma.

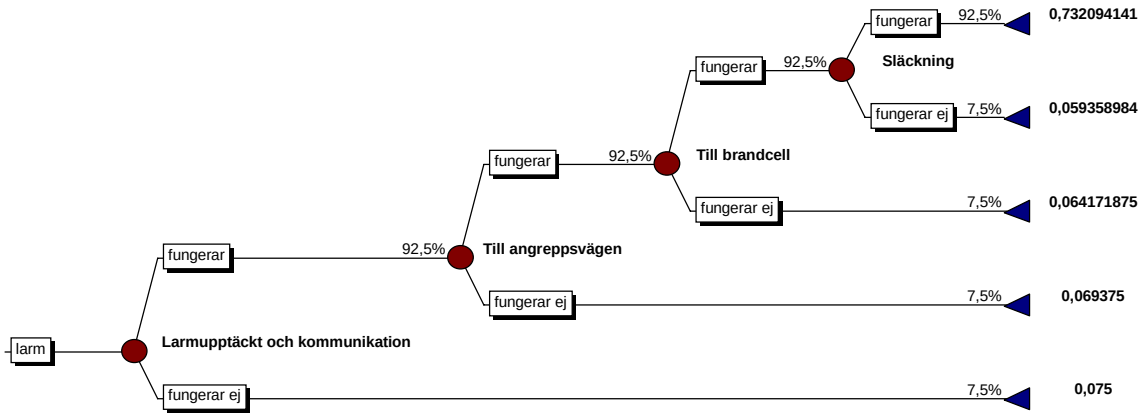
B.1.5 Skydd av komponenter

I dag används denna åtgärd som exempelvis kan vara brandskyddsmålning, som är det som analyseras i denna rapport, endast som en sista utväg. Att enbart förlita sig till brandskyddsmålning är givetvis inte lämpligt, däremot kan det vara en utmärkt kompletterande åtgärd. Vanligtvis används brandskyddsmålning som ett sätt att minska brandbelastningen i ett rum, vilket då kan krediteras genom att mindre brandbelastning ger lägre maximal effektutveckling och kanske ett långsammare brandförlopp. I denna rapport är kabeln som brandbelastning dock inte problemet varför brandskyddsmålningens uppgift istället är att skydda kabeln mot värmepåverkan. Till detta används en färg med varumärket

Flamastic. Färgen fungerar som värmeupptagare genom att färgen vid värmepåverkan avger vissa ämnen (exempelvis, Zn, Fe, Titan) som tar upp värme. Efter en viss tid kommer färgen att förlora sin värmeupptagande eftersom de kemiska ämnena har förbrukats. Exempel på ämnen Försök har visat att en flamasticmålad kabel kan fungera i mellan 70 och 400% längre tid än en oskyddad kabel [38].

B.2 Manuell släckning

En lyckad manuell släckning kräver att ett antal olika moment lyckas inom en viss tid. Vägen till släckning kan ses i händelseträdet i Figur B1.



Figur B. 1 *Händelseträd för manuell släckning*

De sannolikheter som redovisas i figur B.1 är medelvärden av de sannolikhetsfördelningar som använts och som beskrivs i Appedix D. Indata för att beräkna tidsåtgång samt sannolikhet för lyckat delmoment är framförallt hämtat från rapporten ”Metodbeskrivning: analys av manuella ingrepp vid brand”[31]. Tabell B.1 är hämtad från denna rapport.

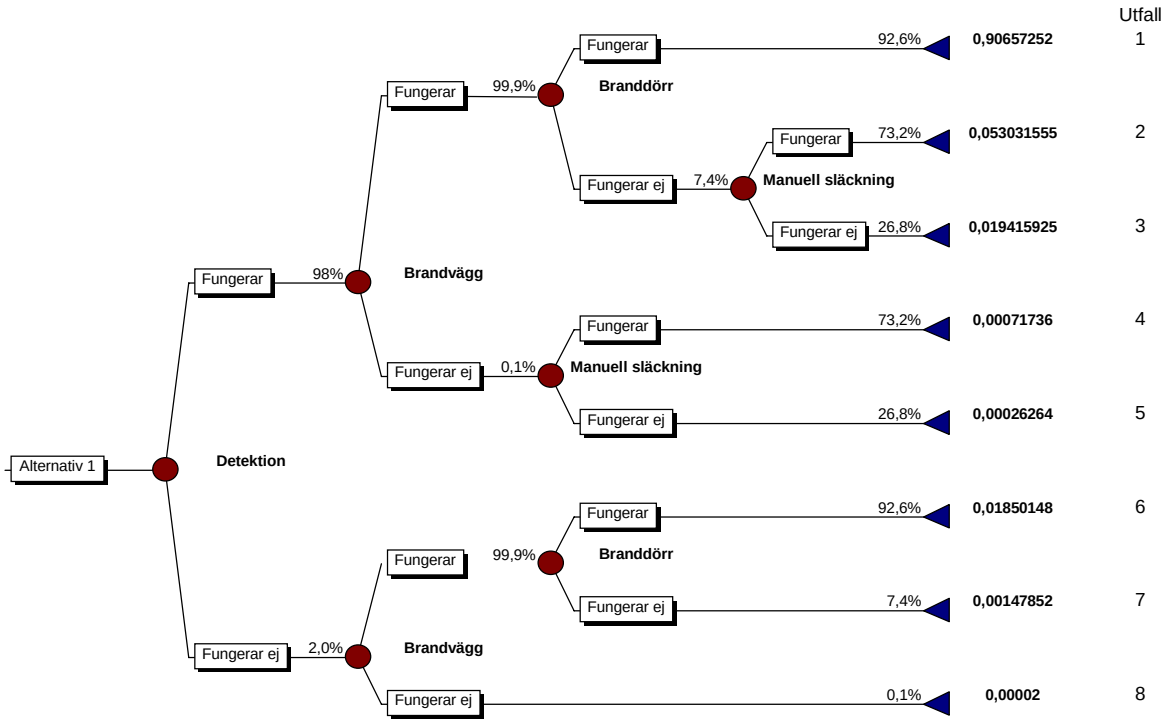
Delmoment	**Tid [min]**	**Sannolikhet för att lyckas med delmomentet**	**Faktorer som påverkar tiden**
Larmupptäckt och kommunikation	1,5	0,75-0,95	Larmens tydlighet, träning
Till samlingsplatsen	2-4	0,05-0,95	Hur långt ifrån samlingsstället de olika personerna befinner sig, träning
Till rummet	1-4	0,75-0,95	Träning och erfarenhet, rummets belägenhet
Lyckad släckning		0,50-0,90	*

Tabell B. 1 *Tid och sannolikhet för delmoment till manuell släckning [31].*

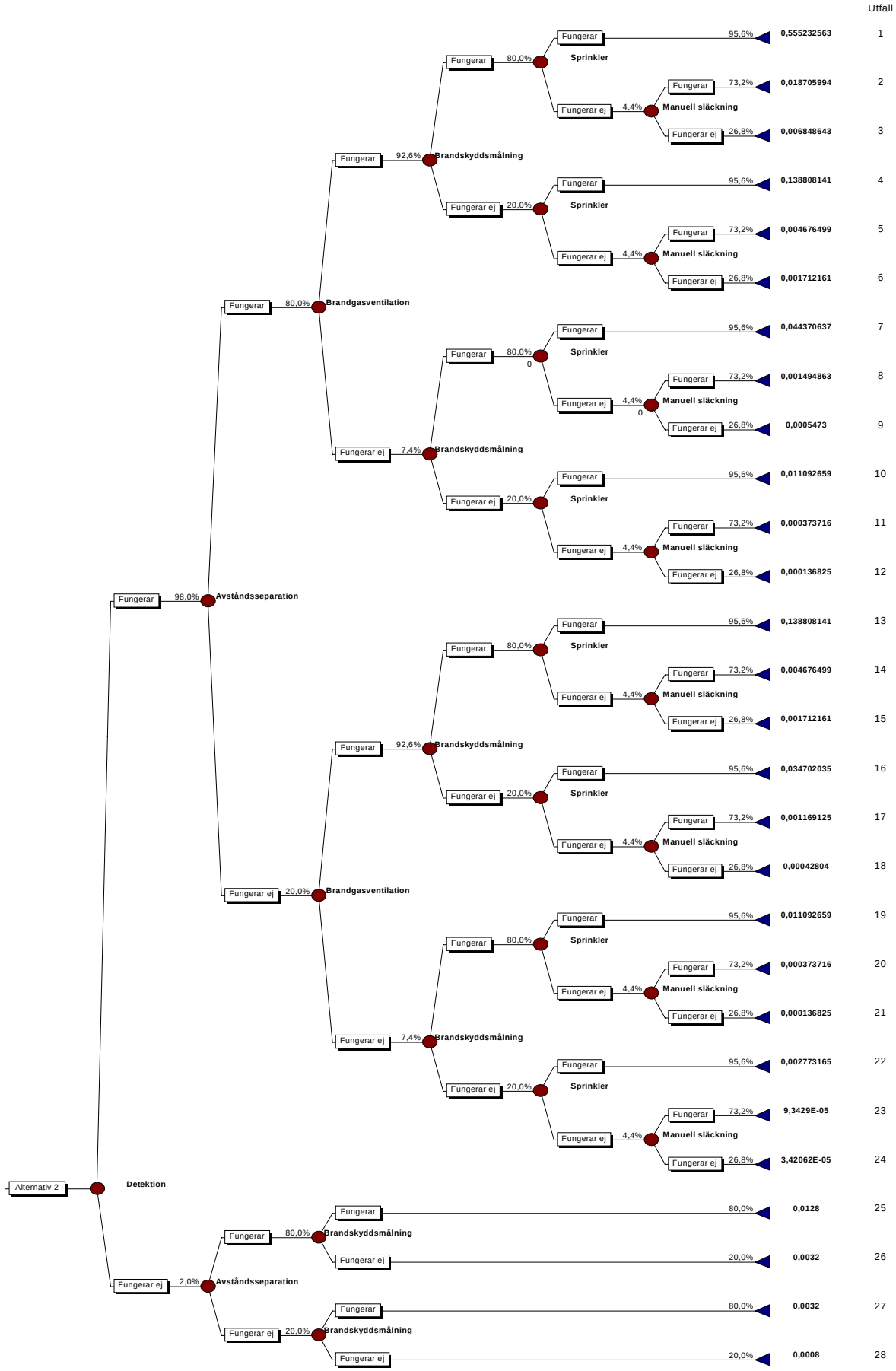
** I BSI-guiden [12] anges följande parametrar som påverkar brandstyrkans effektivitet: 1)Brandstorleken vid första släckförsök, 2)Antalet personer i brandstyrkan och 3)Brandstyrkan tillgångar.*

B.3 Händelseträd över brandskyddsalternativ

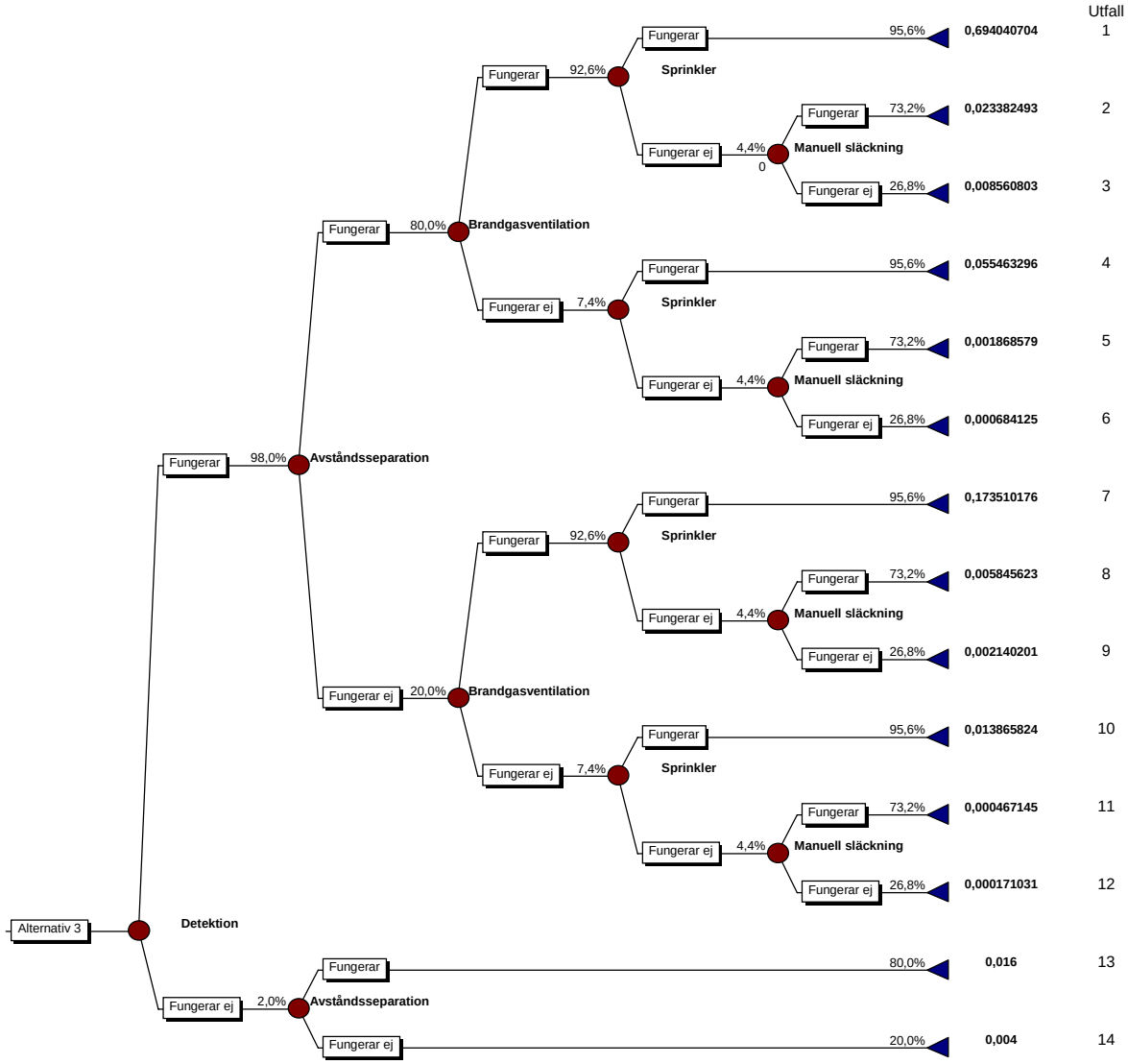
B.3.1 Alternativ 1



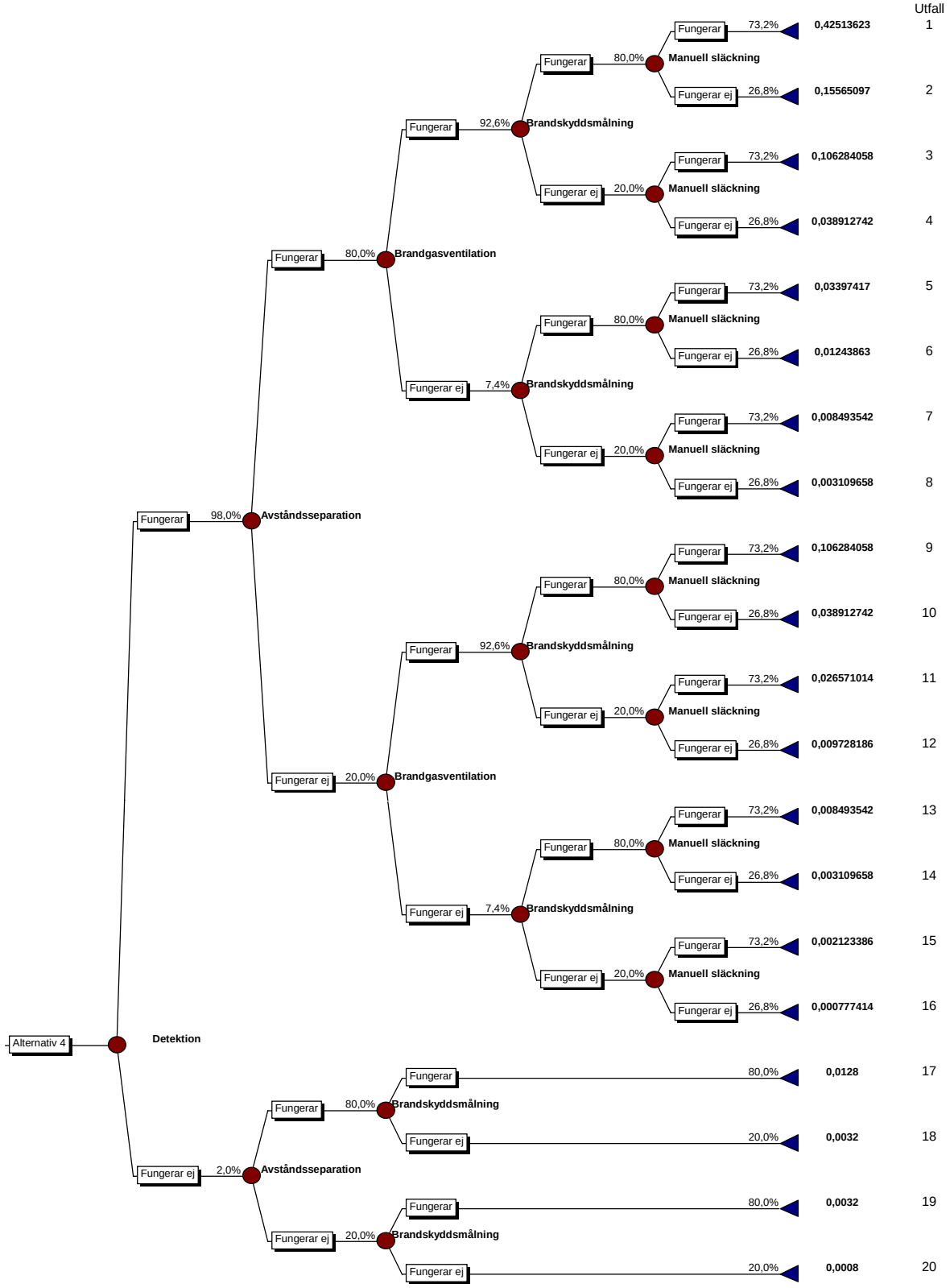
B.3.2 Alternativ 2



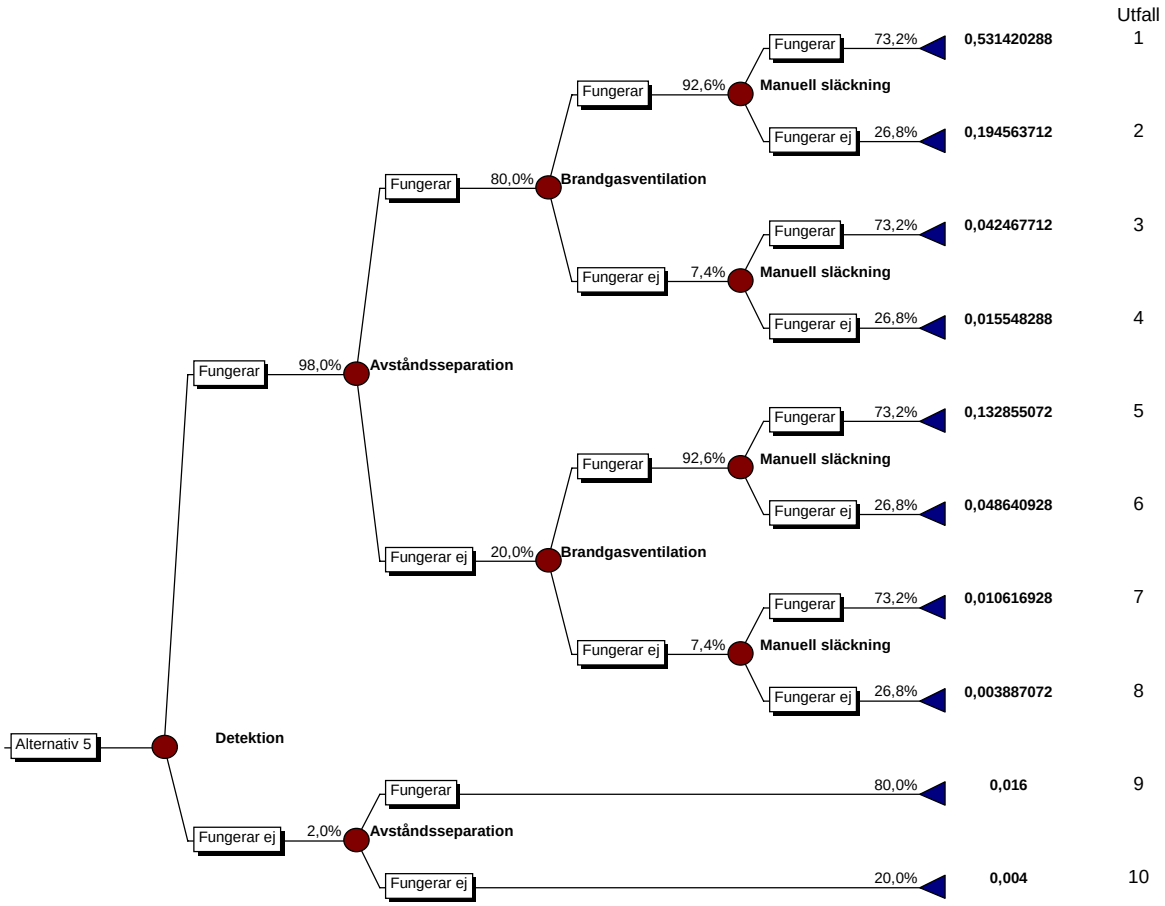
B.3.3 Alternativ 3



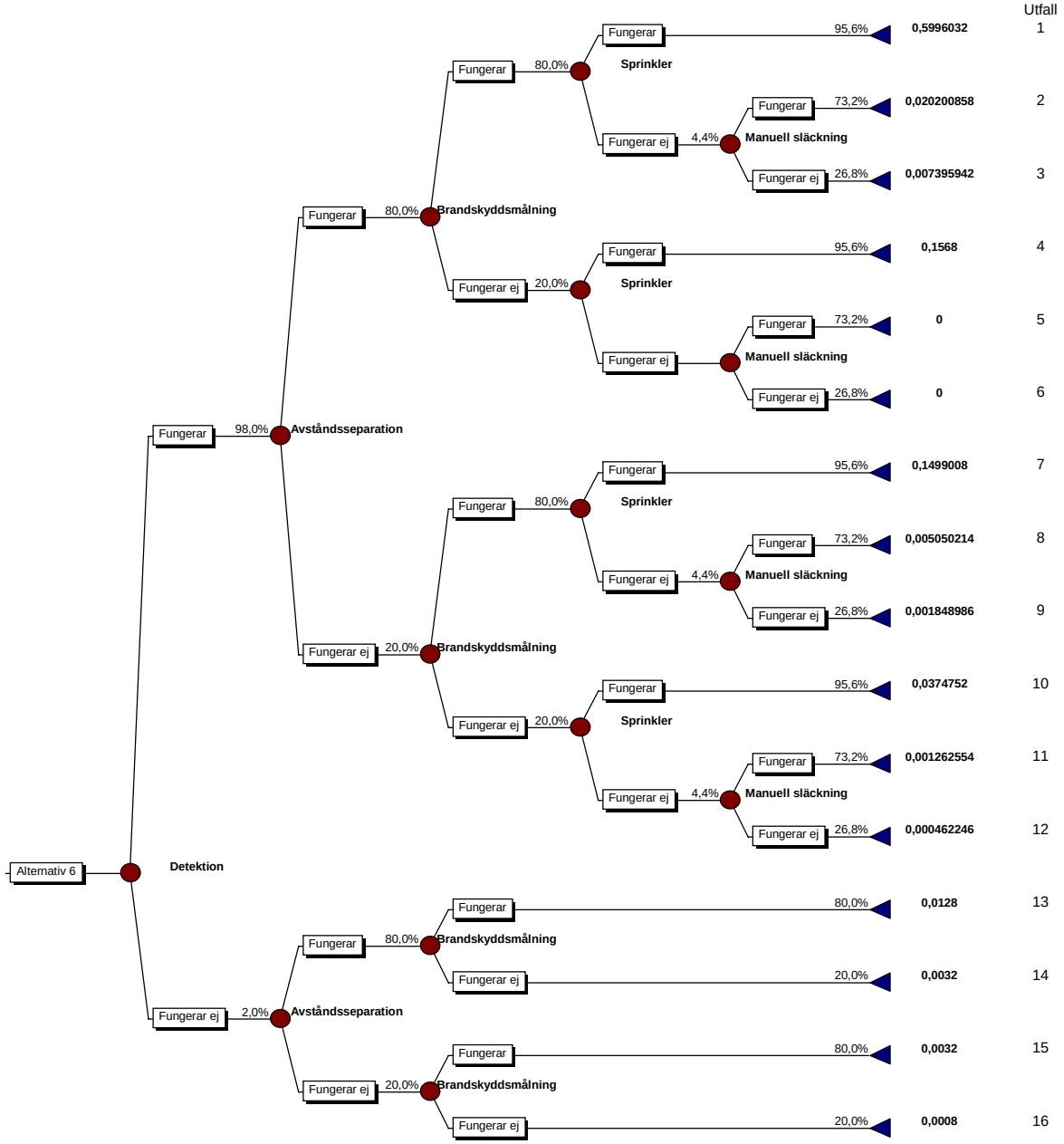
B.3.4 Alternativ 4



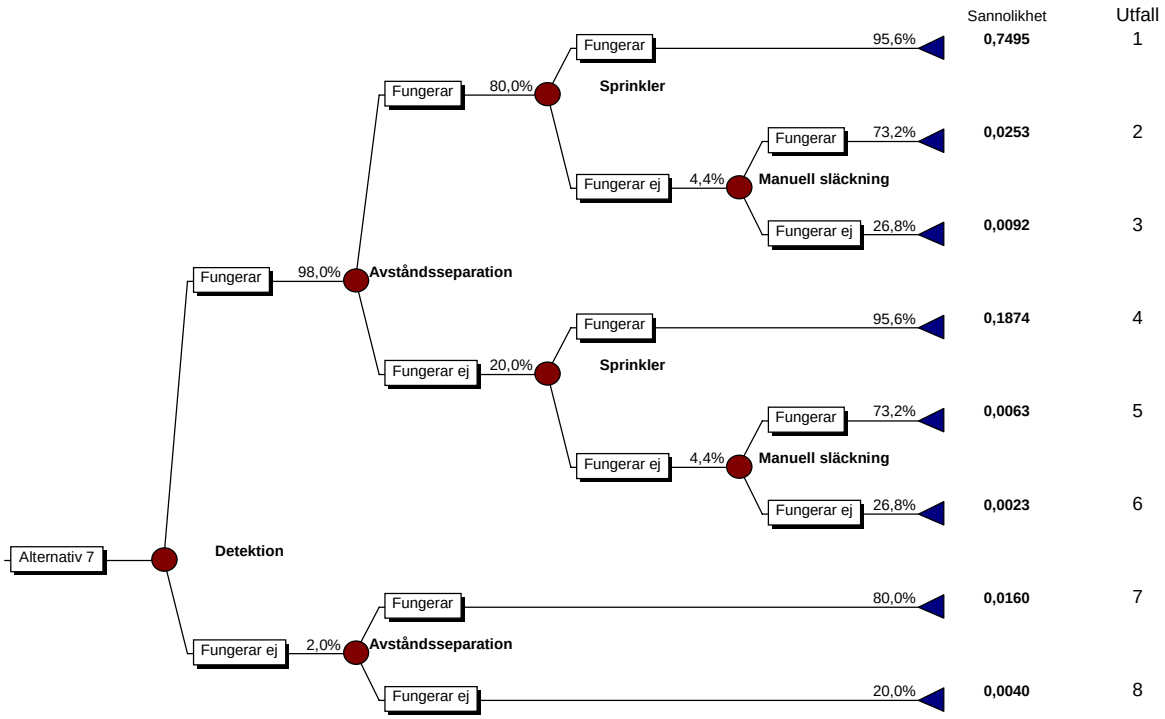
B.3.5 Alternativ 5



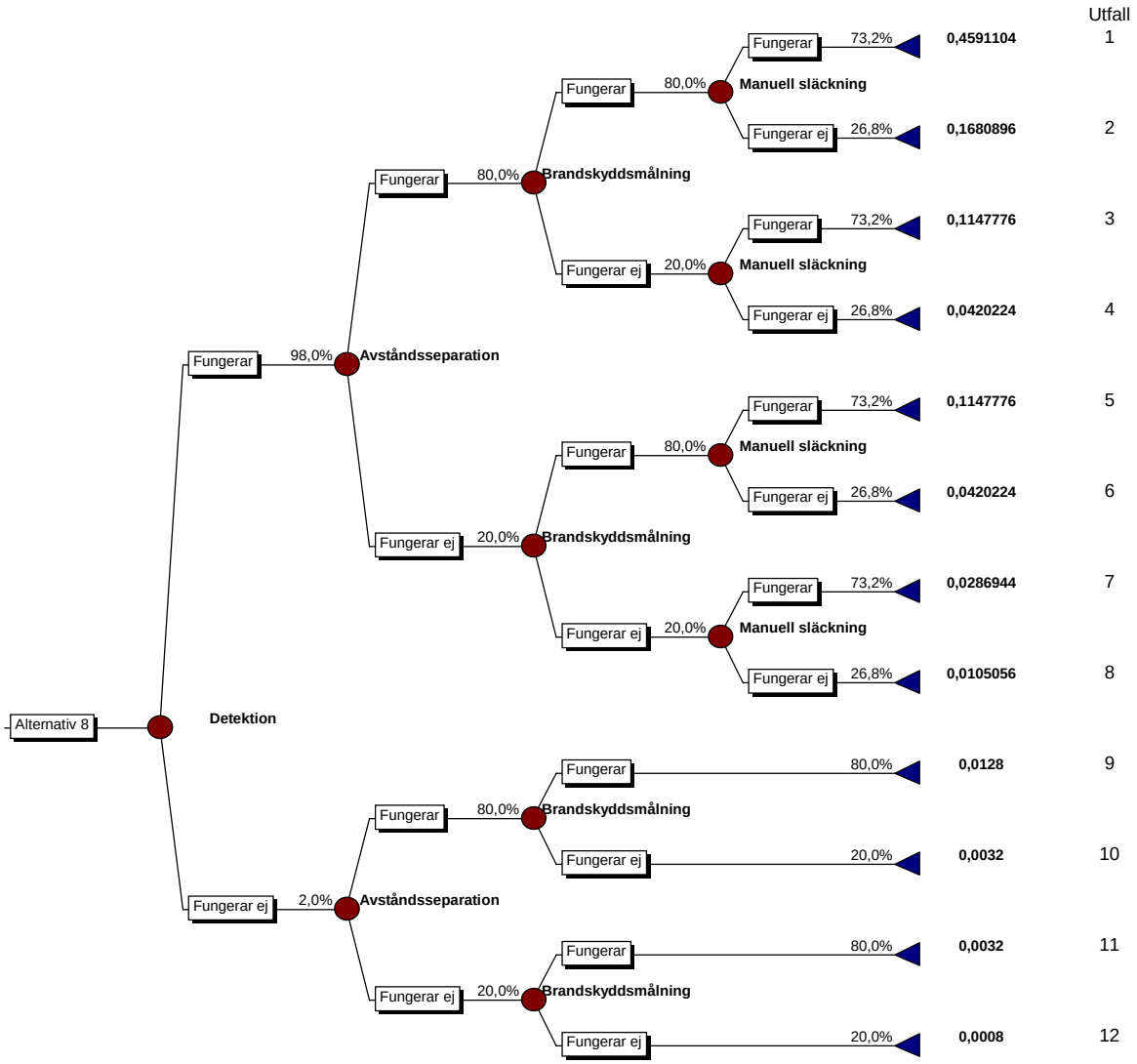
B.3.6 Alternativ 6



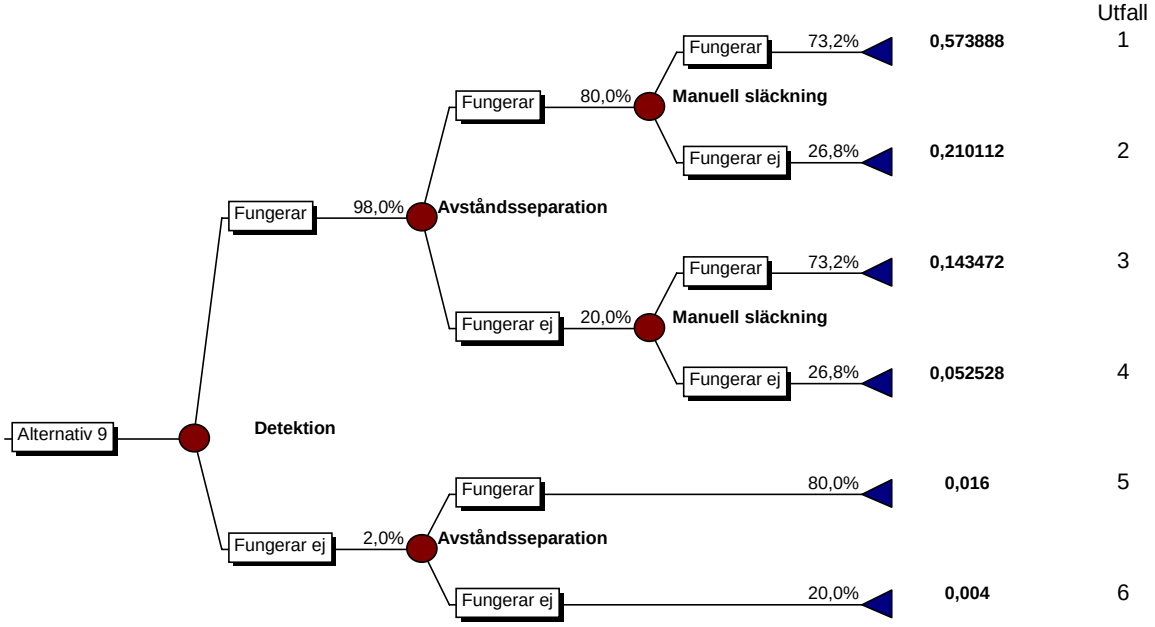
B.3.7 Alternativ 7



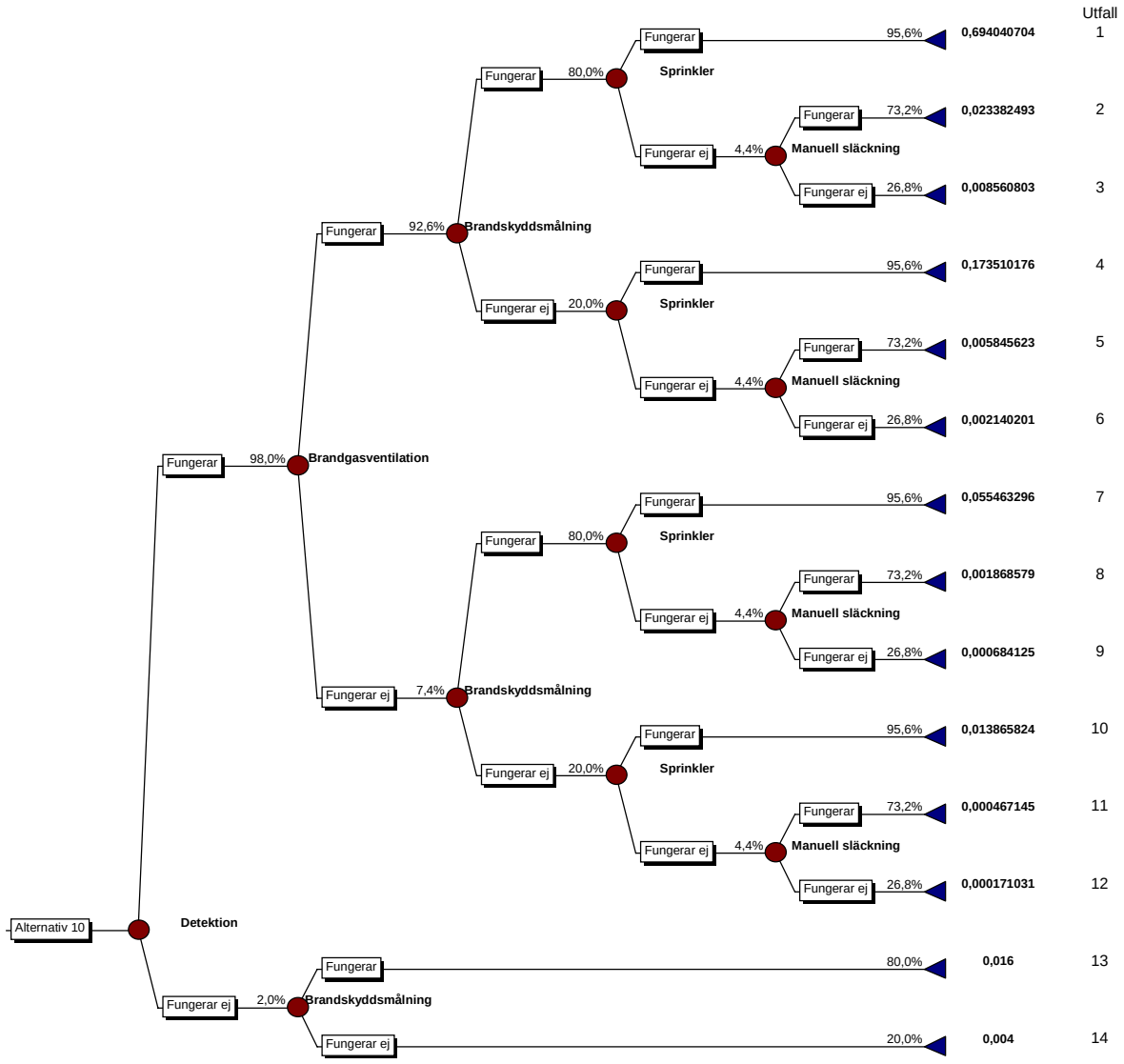
B.3.8 Alternativ 8



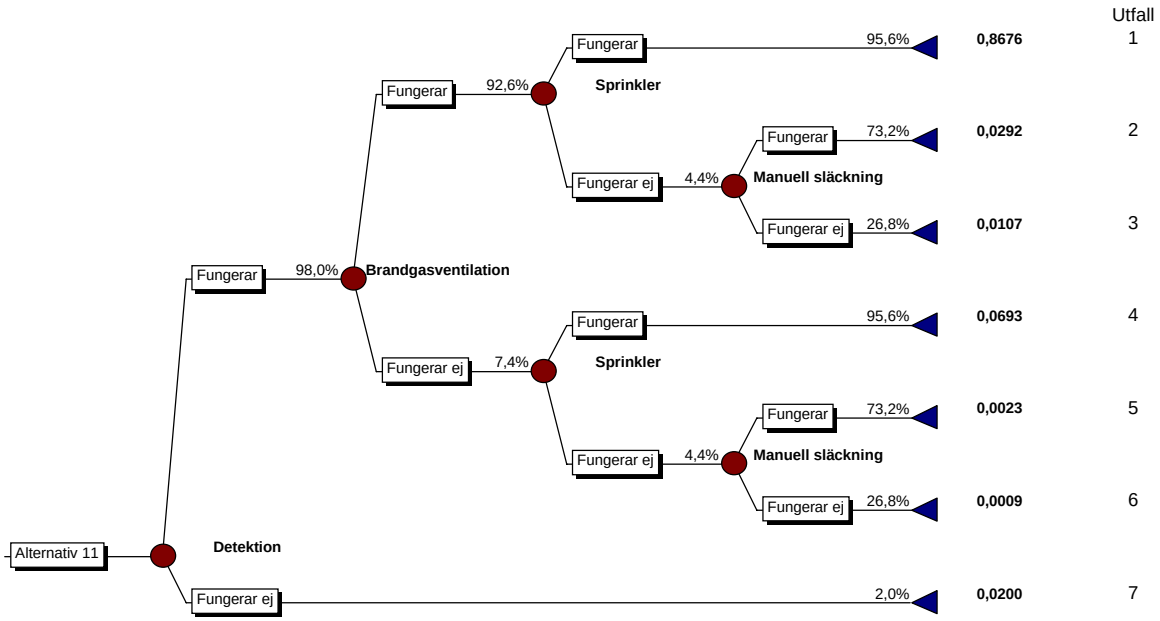
B.3.9 Alternativ 9



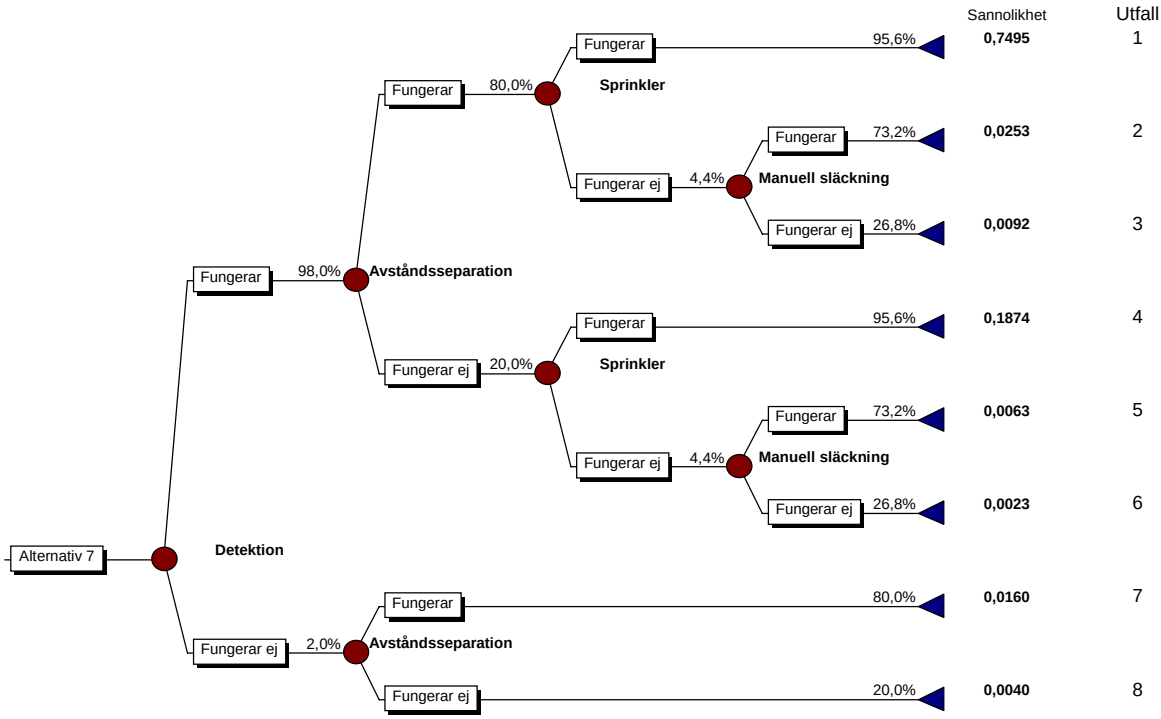
B.3.10 Alternativ 10



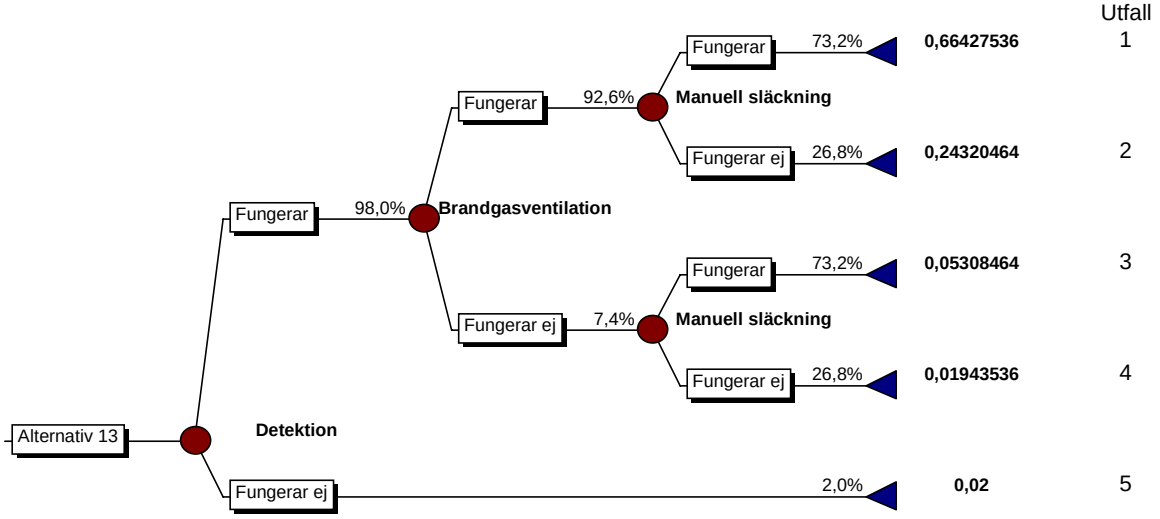
B.3.11 Alternativ 11



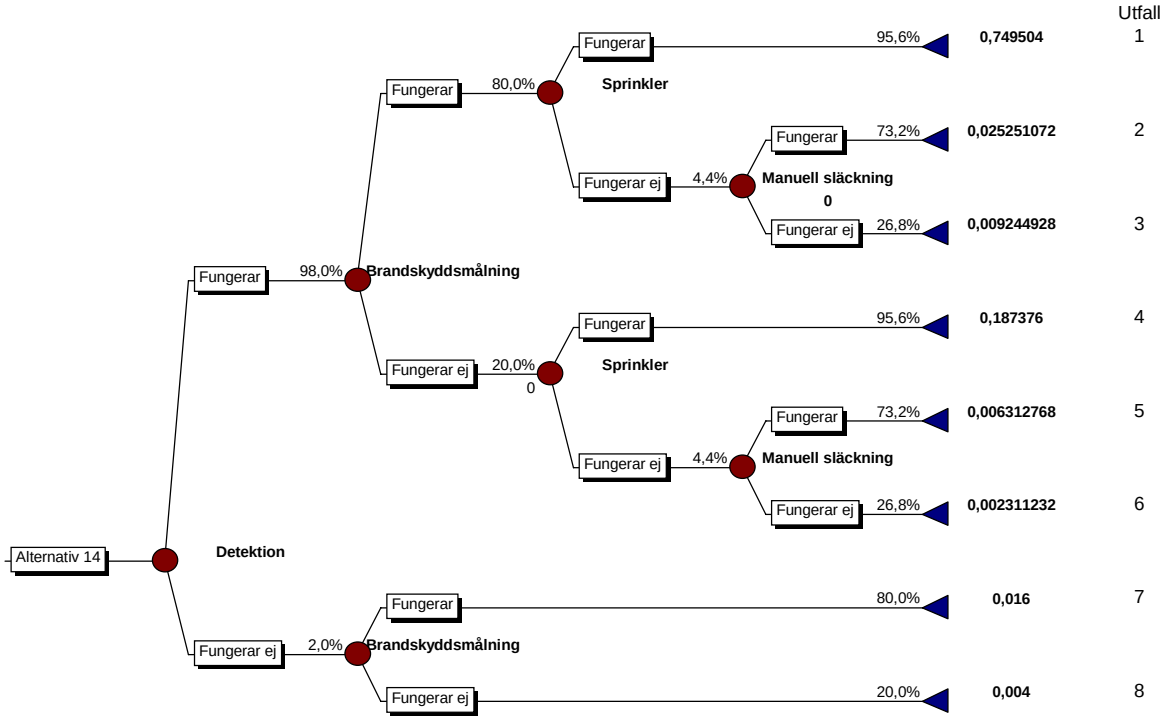
B.3.12 Alternativ 12



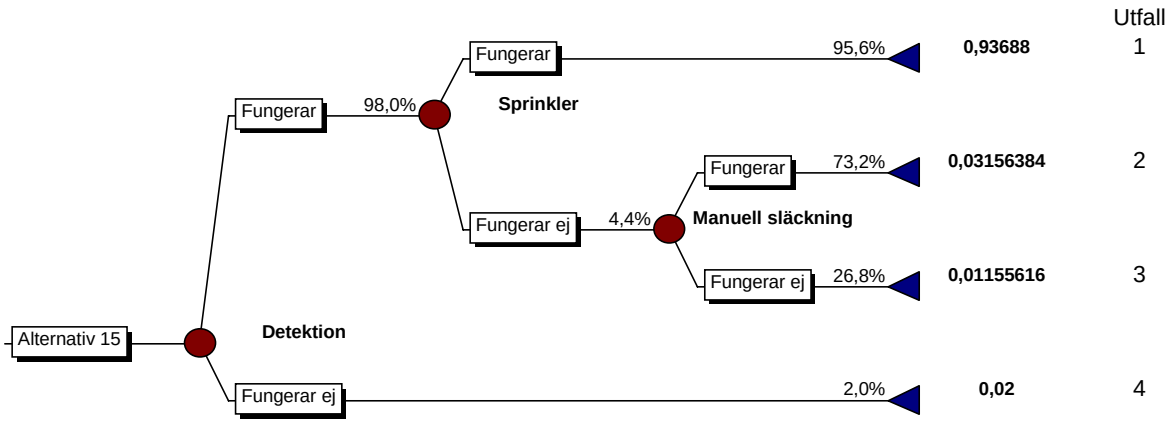
B.3.13 Alternativ 13



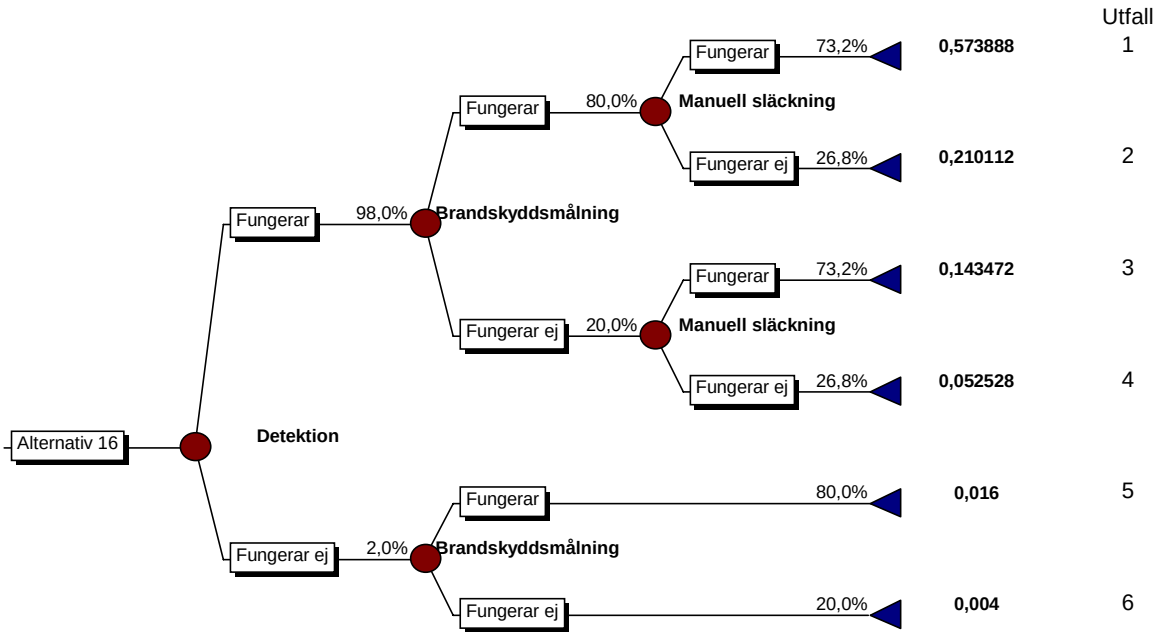
B.3.14 Alternativ 14



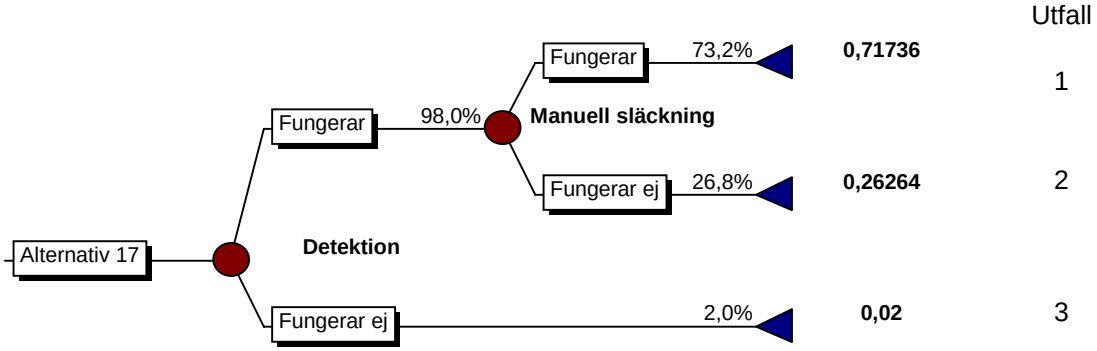
B.3.15 Alternativ 15



B.3.16 Alternativ 16



B.3.17 Alternativ 17



Appendix C

Kalkylblad i @RISK

Innehållsförteckning

C.1 BERÄKNING AV YTTEMPERATUR 91

C.1.1 KOMPONENTPÅVERKAN 91
C.1.2 YTTEMPERATUR 94
C.1.3 KOMPONENTPÅVERKAN MED BRANDVENTILATION 94
C.1.4 KOMPONENTPÅVERKAN VID FYSISK AVSKILJNING 95
C.1.5 OSÄKERHETSANALYS 95
C.1.6 RESULTAT 95

C.1 Beräkning av yttemperatur

För att beräkna påverkan på komponenter på grund av strålning har ett kalkylblad i Excel utarbetats. Excelbladet består av formler för beräkning av temperaturhöjning på komponentyta, orsakad av strålning från flamma, brandgaslager samt heta väggar.

Som indata till programmet används temperaturdata från brandförloppssimuleringar i CFAST, både för väggar och de båda gaslagren. Från CFAST tas också data för rökgaslagrets höjd. Då det i försök har visats att CFAST överskattar temperaturen i rökgaslagret och rökgaslagrets höjd används korrektionsfaktorer framtagna av Lundin [32] för att ta hänsyn till detta.

C.1.1 Komponentpåverkan

Värmeflödet som påverkar en komponent i golvnivå på grund av en brand beräknas enligt nedan [39].

Den totala värmepåverkan på komponenten består av flera delflöden och beräknas enligt följande ekvation.

$$\dot{q}''_{komponent} = \dot{q}''_{f,r} + \dot{q}''_{e,r} + \dot{q}''_{c} - \sigma \cdot T_s^4 \qquad (1)$$

där $\dot{q}''_{f,r}$ är värmeflödet i kW/m^2 på grund av strålning från flamma, $\dot{q}''_{e,r}$ är värmeflödet i kW/m^2 på grund av strålning från brandgaslager och omslutande ytor och $\dot{q}''_{c}$ är det konvektiva värmeflödet i kW/m^2. Då komponenten befinner sig i golvnivå där inga varma brandgaser antas befinna sig (enligt tvåzonsmodellen) så bortses från detta värmeflöde. T_s är komponentens yttemperatur i grader Kelvin och σ är Stefan Boltzmanns konstant [kW/m^{2}K^4].

Strålningen från flamman, $\dot{q}''_{f,r}$, beräknas enligt följande:

$$\dot{q}''_{f} = \sigma \cdot T_f^4 \cdot \varepsilon\left(F_1 + F_2 + F_3\right) \qquad (2)$$

där

$$\varepsilon \cong 1 - \exp(-0.7\mu)$$

där

$$\mu = \frac{2r\kappa_f}{\sin\beta}$$

där

$$\beta = \frac{\theta_0 + \pi/2}{2}$$

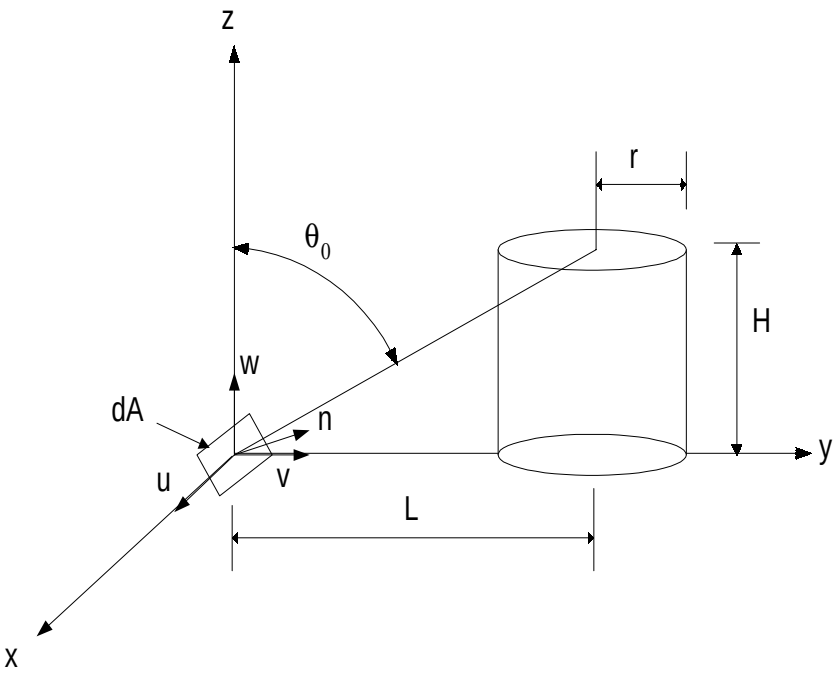
där κ_f = flammans effektiva absorptionskoefficient. F1, F2 och F3 är så kallade synfaktorer vilka beror av avstånd och vinkel mellan flamma och komponent. Synfaktorerna beräknas enligt följande formler.

$$F_1 = \frac{u}{4\pi}\left(\frac{r}{L}\right)^2 \left(\pi - 2\theta_0 + \sin 2\theta_0\right)$$

$$F_2 = \frac{v}{2\pi}\left(\frac{r}{L}\right)\left(\pi - 2\theta_0 + \sin 2\theta_0\right)$$

$$F_3 = \frac{w}{\pi}\left(\frac{r}{L}\right)\cos^2\theta_0$$

Parametrarna definieras i figur C.1. Alla vinklar är i enheten radianer och alla längder i meter.



Figur C. 1 *Beskrivning av strålning från en homogen cylindrisk flamma och ett element dA.*

Strålningen från brandgaslager och väggar, $q_{e,r}''$, fås enligt nedan.

$$\dot{q}''_{e,r} = \sum_{i=1}^{4} \dot{q}''_i \qquad (3)$$

där

$$\dot{q}_i'' = \frac{1}{2\pi}\left[\left(\frac{a_i}{L_{a,i}}\right)\tan^{-1}\left(\frac{b_i}{L_{a,i}}\right) + \left(\frac{b_i}{L_{b,i}}\right)\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{L_{b,i}}\right)\right]\cdot$$

$$\cdot\left\{\left[1 - \exp\left(\kappa_{g,u} L_{m,i}\right)\right]\sigma T_{g,u}^4 + \exp\left(-\kappa_{g,u} L_{m,i}\right)\sigma T_c^4\right\} +$$

$$+\frac{\sigma T_a^4}{2\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{b_i}\right) - \frac{b_i}{L_{b,i}}\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{L_{b,i}}\right)\right] + \frac{\sigma T_b^4}{2\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right) - \left(\frac{a_i}{L_{a,i}}\right)\tan^{-1}\left(\frac{b_i}{L_{a,i}}\right)\right]$$

där

$$L_{a,i} = \sqrt{\left(H_1^2 + a_i^2\right)}$$

$$L_{b,i} = \sqrt{\left(H_1^2 + b_i^2\right)}$$

$$L_{m,i} = \frac{2a_i b_i \left(H_2 - H_1\right)}{\left(H_2 - H_1\right)\left(a_i - b_i\right) + a_i b_i}$$

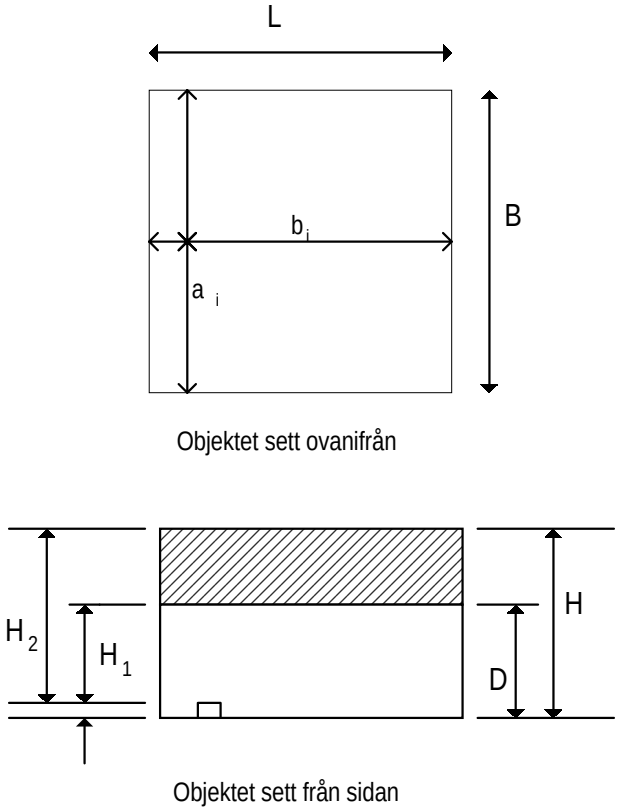
$\kappa_{g,u}$ = Brandgasernas effektiva emissionskoefficient [m^{-1}]

$T_{g,u}$ = Temperatur i övre rökgaslager [K]

T_c = Temperatur på ytor i övre rökgaslager [K]

T_a och T_b = Temperatur på ytor i nedre rökgaslager [K]

a_i och b_i = Kvadratens dimensioner enligt figur D.2 [m]



Figur C. 2 *Beskrivning av modellparametrar vid bestämning av strålning till objekt i golvnivå.*

Det totala värmeflödet [kW/m^2] till komponenten pga strålning blir:

$$\dot{q}''_{komponent} = \tau_{g,l}\left(\dot{q}''_{f,r} + \sum_{i=1}^{4} \dot{q}''_i\right) - \sigma T_s^4 \qquad (4a)$$

Där $\tau_{g,l}$ tar hänsyn till att en viss blandningsgrad mellan övre och nedre brandgaslager förekommer. Denna inblandning av rök i det nedre brandgaslagret gör att en viss strålning absorberas av röken och värmeflödet som når komponenten blir därmed mindre. Normalt

varierar värdet på denna faktor mellan 0.9 och 1.0. I kalkylbladsberäkningarna har konservativt antagits att denna blandningsgradsfaktor är lika med ett.

C.1.2 Yttemperatur

Yttemperaturen på det utsatta objektet beräknas med utgångspunkt från ett standardsamband för hur yttemperaturen ökar vid konstant värmestrålning, utan värmeövergångstal. Detta samband kan användas under förutsättning att isoleringsmaterialet runt kabeln antas vara halvoändligt, dvs att tjockleken, L, uppfyller följande villkor.

$L >= 2.8 \sqrt{(\alpha t)}$ där $\alpha = k/(\rho c)$

Där k är materialets värmeledningsförmåga [W/mK], ρ är materialets densitet [kg/m^3] och c är materialets specifika värmekapacitet [J/kgK].

Vid beräkning av temperaturökningen antas värmepåverkan vara konstant under ett visst tidssteg. Värdet på yttemperaturen kan då beräknas efter varje tidsteg. I det första tidssteget kan då yttemperaturen beräknas med utgångspunkt från komponentens yttemperatur innan branden startade, detta värde används sedan som indata för beräkning av nästa tidstegs yttemperatur. Sambandet nedan gäller vid antagande av halvoändlig vägg, där värmetransporten endast sker tvådimensionellt i väggens genomskärning.

$$T_{0,t} = T_{0,t-\Delta t} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\dot{q}''_{komponent} \cdot \sqrt{\Delta t}}{\sqrt{k\rho c}} \qquad (5)$$

$T_{0,t}$	=	Objektets yttemperatur vid tiden t $[°C]$
$T_{0,t-\Delta t}$	=	Objektets yttempertur vid föregående tidssteg $[°C]$
$k\rho c$	=	Objektets värmeupptagningsförmåga $[kW^2 s / m^4 °C^2]$
Δt	=	Tidsstegets längd $[s]$
$\dot{q}''_{komponent}$	=	Total effektpåverkan i aktuellt tidssteg $[kW / m^2]$

C.1.3 Komponentpåverkan med brandventilation

Om brandventilation finns jämförs flödet upp i brandgasplymen med ventilationsflödet för att se om något brandgaslager bildas. Om ventilationsflödet är större än plymflödet, det vill säga inget brandgaslager antas bildas, så kommer den enda påverkan på komponenter från strålning från flamma.

$$\dot{V}_{plym} = \dot{m}_{plym} \cdot \frac{PM}{RT} \qquad (6)$$

$\dot{V}_{vent} > \dot{V}_{plym} \Rightarrow$ endast strålning från flamma beaktas

$\dot{V}_{plym}$ = Flöde upp i brandgasplymen $[m^3/s]$

$\dot{m}_{plym}$ = Massflöde i plymen [kg/s]

P = Tryck i rummet [Pa] (lufttryck + ΔP från FAST)

M = Brandgasernas molmassa [kg/mol], approximeras med luft

R = Gaskonstant [J/kmolK]

T = Brandgastemperatur [K], från FAST

$\dot{V}_{vent}$ = Ventilationsflöde $[m^3/s]$

Värmeflödet som påverkar komponenten blir då:

$$\dot{q}''_{komponent} = \tau_{g,l} \cdot \dot{q}''_f - \sigma T_s^4 \qquad (4b)$$

där $\dot{q}''_f$ beräknas enligt ekvation (2).

C.1.4 Komponentpåverkan vid fysisk avskiljning

Då de redundanta systemen är avskilda med hjälp av en vägg och en brand startar på ena sidan av denna vägg påverkas komponenten på andra sidan väggen inte av flammorna från branden, men däremot av den rök som på grund av olika anledningar kan antas sprida sig till andra sidan den avskiljande väggen. Värmeflödet som påverkar komponenten beräknas då enligt följande.

$$\dot{q}''_{komponent} = \tau_{g,l} \cdot \left(\sum_{i=1}^{4} \dot{q}''_i \right) - \sigma T_s^4 \qquad (4c)$$

där $\sum_{i=1}^{4} \dot{q}''_i$ beräknas enligt ekvation (3).

C.1.5 Osäkerhetsanalys

För att ta hänsyn till osäkerheter i indata görs med hjälp av datorprogrammet @risk en osäkerhetsanalys. Indata varieras då enligt inprogrammerade fördelningar enligt Appendix D.

C.1.6 Resultat

Kalkylprogrammets direkta resultat redovisas som sannolikhetsfördelningar över yttemperaturen i varje tidpunkt. Detta kombineras med komponentens kritiska temperatur och en fördelning över sannolikheten för att denna temperatur överskrids vid olika tidpunkter tas fram.

Appendix D

Indata

Innehållsförteckning

D.1 BRANDFÖRLOPPSSIMULERINGAR 99

D.1.2 EFFEKTUTVECKLING 99
D.1.2.1 Scenario 1 99
D.1.2.2 Scenario 2 100
D.1.2.3 Scenario 3 101
D.1.1 INDATA TILL CFAST 101
D.1.1.1 Omgivningsdata 101
D.1.1.2 Objektdata 101
D.1.1.3 Ventilationsförhållanden 101

D.2 KALKYLBLAD I @RISK 102

D. 2.1 INDATA FRÅN PROBABILISTISK BRANDANALYS 103

D.3 SÄKERHETSMARGINAL 103

D.3.1 DETEKTIONSTID 103
D.3.2 AKTIVERINGSTID 104
D.3.3 SLÄCKTID 104
D.3.4 KRITISK TID 105

D.4 SANNOLIKHETSFÖRDELNINGAR 106

D.5 KOSTNADER 107

D.1 Brandförloppssimuleringar

Först redovisas de beräkningar som gjorts för att effektutvecklingskurvan som skall användas i CFAST version 3.1.3 [28], sedan presenteras resterande indata till brandförloppssimuleringarna med hjälp av CFAST.

D.1.2 Effektutveckling

D.1.2.1Scenario 1

Effektutveckling vid brand i olja beräknas enligt följande formel för brand i vätskepöl:

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

där

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

Ur SFPE-handboken [30] tabell 2-1.2 fås:

$\dot{m}''_{\infty} = 0.035$ kg/m^{2}s

$k\beta = 1{,}7$ m^{-1}

$\Delta Hc = 40$ MJ/m^2

Pölens diameter antas vara cirka 1,2 meter.

D = 1.2 m $\quad \Rightarrow \quad A = \pi\left(\frac{1{,}2}{2}\right)^2 = 1{,}13$ m^2

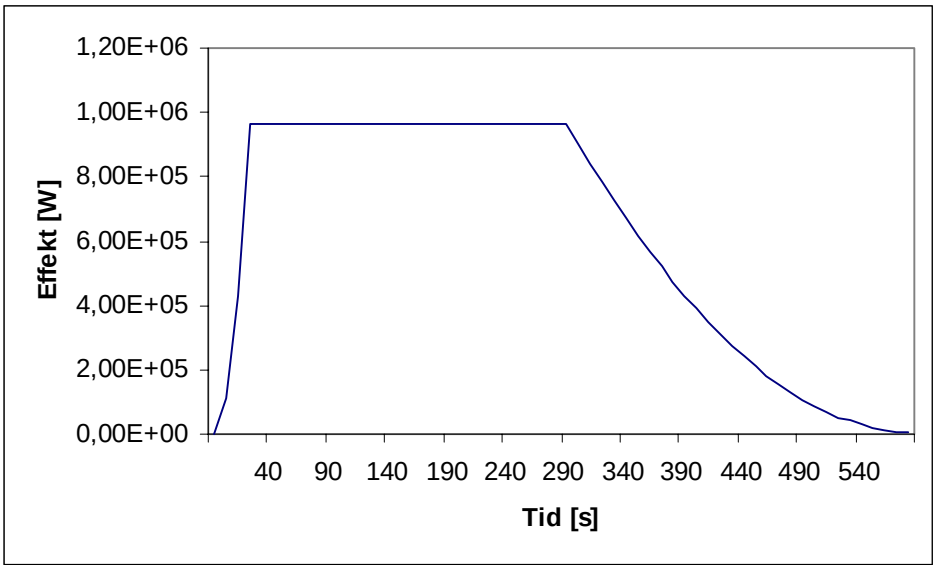
χ är en effektivitetsfaktor som som tar hänsyn till ofullständig förbränning. Här antas χ vara lika med 0,7.

Dessa indata ger:

$Q_{max} \approx$ 960 kW

Oljans avbrinningshastighet är normalt mellan 3-4 mm/min [30]. Vilket ger en brinntid på omkring 5 minuter.

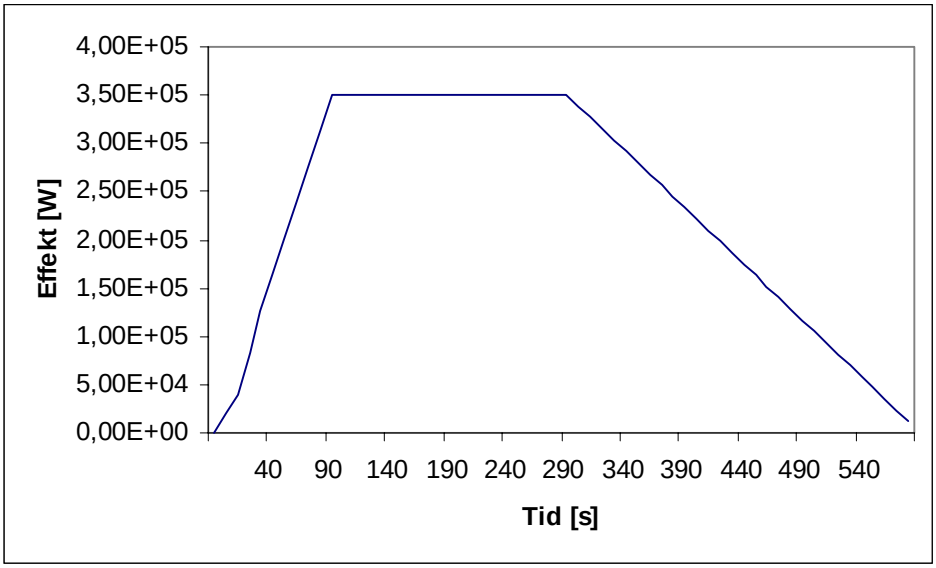
Effektutvecklingskurvan som används som indata till CFAST får utseende enligt figur D.1.



Figur D. 1 *Effektutvecklingskurva för scenario 1.*

D.1.2.2Scenario 2

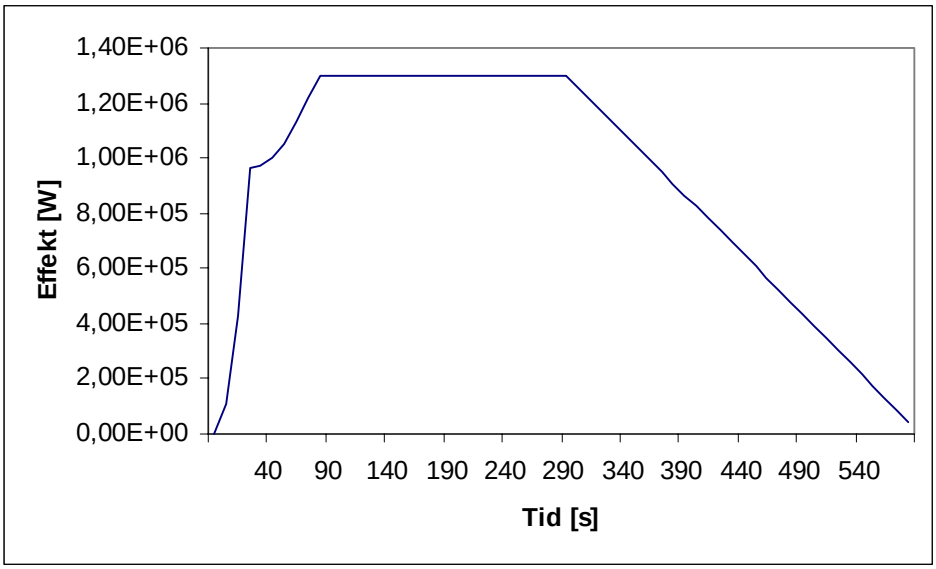
Effektutvecklingskurvan för sopsäcksbranden är hämtad från SFPE-handboken [30] Figur 2-1.19. Branden antas vara fullt utvecklad efter cirka 60 sekunder och antas sedan fortgå med full effekt i fyra minuter och antas sedan avta linjärt för att vara helt utbrunnen efter tio minuter.



Figur D. 2 *Effektutvecklingskurva för scenario 2.*

D.1.2.3Scenario 3

Effektutvecklingskurvan är helt enkelt en sammanslagning av effektutvecklingskurvorna för scenario 1 och 2. Efter 30 sekunder har effekten 960 kW uppnåtts och vid denna tidpunkt antas sopsäcken antändas, efter ytterligare 60 sekunder är effekten 1310 kW. Efter fem minuter antas effekten börja avta, för att vara noll efter 10 minuter.



Figur D. 3 *Effektutvecklingskurva för scenario 3.*

D.1.1 Indata till CFAST

I indatafilerna för de olika scenariona till CFAST , det vill säga Sc1.DAT, Sc2.DAT och Sc3.DAT presenteras bland annat följande indata.

D.1.1.1Omgivningsdata

- Temperatur
- Tryck
- Vindhastigheten

D.1.1.2Objektdata

- Utrymmets längd, bredd och höjd
- Material i tak och väggar

D.1.1.3Ventilationsförhållanden

Ventilationsöppningars:

- Storlek
- Vindhastighet
- Öppning /stängning

Då mekanisk ventilation i CFAST ej kan stängas av efter viss tid har den mekaniska ventilationen approximerats med ventilationsöppningar motsvarande det mekaniska flödet. Då fläktarna antas slås ut, då brandgaserna uppnått cirka 70°C [29] (sker efter ungefär 60 sekunder), stängs dessa öppningar och öppningar som motsvarar storleken på fläktöppningen (0,3*0,3 m) öppnas istället.

D.2 Kalkylblad i @RISK

I tabell D.1 nedan presenteras de indata som använts för att beräkna yttemperatur vid olika tidssteg i kalkylbladet i @risk.

Parameter	**Värde/fördelning**	**Kommentar**
σ, Stefan Boltzmanns konstant	$5.67*10^{-11}$ kW/m^{2}K^4	
T_f , flamtemperatur	1200 K	Enligt referens [40]
r, flammans radie	RiskTriang(0,4;0,6;0,8) m	
κ_f , flammans effektiva absorptionskefficient,	RiskTriang(0,42;0,43;0,44) m^{-1}	Enligt referens [40]
u	0	Enligt figur C.1
v	1	Enligt figur C.1
w	0	Enligt figur C.1
L, avstånd mellan flamma och objekt Med avståndsseparation Scenario 1: Scenario 2,3: Utan avståndsseparation Scenario 1: Scenario 2,3:	 6 RiskUniform(6;7) RiskTriang(4;6;7) RiskUniform(3;7)	
H, Flammans höjd	$0.235Q^{2/5}$ - 1.02D m	Enligt referens [40]
a_{1-4}	4 m	Enligt figur C.2
$b_{1,3}$	7 m	Enligt figur C.2
$b_{2,4}$	1 m	Enligt figur C.2
Korrektionsfaktor för temperatur i brandgaslager	RiskNormal(0,65;0,052)	Enligt referens [32]
Korrektionsfaktor för avstånd mellan brandgaslager och golv	RiskNormal(1,4;0,042)	Enligt referens [32]
$\tau_{g,l}$, blandningsgradsfaktor	1	Se Appendix C
Δt ,tidsstegets längd	20 s	
$\kappa_{g,u}$, brandgasernas effektiva emissionskoefficient	RiskTriang(1;1,1;1,2)	Enligt referens [40]
$k\rho c$, kabelns värme-upptagningsförmåga	RiskUniform(0,24;0,35)	Enligt referens [40]
$T_{s,0}$, kabelns yttemperatur vid tiden noll	298 K	

Tabell D. 1 *Indata för beräkning av yttemperatur.*

Övriga indata, i form av rökgaslagrets temperatur ($T_{g,u}$), temperaturen på väggar och tak (T_c, T_a, T_b), samt effekt (Q) är hämtade från CFAST-resultaten för respektive scenario alternativt från en tidigare utförd probabilistisk brandanalys enligt nedan.

D. 2.1 Indata från probabilistisk brandanalys

I en probabilistisk brandanalys görs brandförloppssimuleringar för ett antal olika scenarion med olika maximal effekt. För varje scenario görs i sin tur brandförloppssimuleringar med olika indata i form av osäkra parametrar, såsom brandens placering, effektutvecklingshastighet och ventilationsförhållanden. Varje scenario tilldelas en viss sannolikhet för att det skall inträffa och för varje scenario tilldelas olika värden på olika parametrar specifika sannolikheter. Ett exempel på sannolikhetsfördelning över tillväxthastigheten α beroende på scenario ges i tabellen nedan.

Effekt [kW]/alfa, α	**0,0003**	**0,0006**	**0,0029**	**0,0117**	**0,047**
200	0,2	0,4	0,25	0,1	0,05
400	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1
600	0,15	0,3	0,2	0,2	0,15
800	0,15	0,25	0,3	0,2	0,1
1600	0,15	0,25	0,3	0,2	0,1

Tabell D. 2 *Exempel på sannolikhetsfördelning för tillväxthastighet, α.*

Den probabilistiska brandanalysen innefattar alltså bland annat ett stort antal brandförloppssimuleringar. Resultat från dessa simuleringar kan användas för att göra sannolikhetsfördelningar i varje tidssteg för parametrar som effektutveckling, rökgaslagrets höjd samt temperatur på väggar och i rökgaslager. Dessa sannolikhetsfördelningar kan sedan användas som indata i kalkylbladet för beräkning av yttemperatur istället för de deterministiskt bestämda värdena.

D.3 Säkerhetsmarginal

För att beräkna säkerhetsmarginalen med hjälp av @risk enligt kapitel 7.7.2 gäller följande förutsättningar och antaganden samt indata.

D.3.1 Detektionstid

Tiden till dess att rökdetektorerna aktiveras beror av tiden det tar för röken att nå taknivå samt detektorernas känslighet. Detta har simulerats med hjälp av datorprogrammet DETACT-T2 [33]. Om detektion ej sker automatiskt antas branden ej bli upptäckt innan de säkerhetskomponenterna slagits ut. I nedanstående tabell visas de fördelningar som använts som detektionsindata till beräkningarna av säkerhetsmarginalen i @risk.

Detektionstid	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Rökdetektorer	RiskUniform(20;30)	RiskUniform(40;50)	RiskUniform(20;30)
Manuell	-	-	-

Tabell D. 3 *Indata till säkerhetsmarginalsberäkningar, detektionstid.*

D.3.2 Aktiveringstid

Aktivering av sprinklersystem skall efter detektion ske manuellt då rädsla finns för de skador som en omotiverad aktivering av släcksystemet kan orsaka. Den manuella aktiveringen antas ta mellan 15 och 30 sekunder. Detta är en mycket grov uppskattning och gäller under förutsättning att vakt eller annan personal alltid finns i närheten av utrymmet eller att vakt har mer eller mindre konstant övervakning av utrymmet. Att inte en längre, och kanske i dagsläget mer realistisk, tid valts är beroende på att en längre tid helt enkelt inte kan accepteras i denna typ av utrymmen där säkerhetsrelaterade komponenter riskerar att slås ut av brand.

Tid till aktivering av manuell släckning innefattar ett antal delsteg som presenteras som händelseträd i Appendix B. I tabell D.3.2 nedan visas de indata som använts för beräkning av säkerhetsmarginalen i @RISK.

Aktiveringstid	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Sprinkler	RiskTriang(15;25;30)	RiskTriang(15;25;30)	RiskTriang(15;25;30)
Manuell: L & K* Till saml.pl. Till rummet	 RiskUniform(30;60) RiskTriang(120;240;240) RiskTriang(120;160;180)	 RiskUniform(30,60) RiskTriang(120,240,240) RiskTriang(120,160,180)	 RiskUniform(30,60) RiskTriang(120,240,240) RiskTriang(120,160,180)

Tabell D. 4 *Indata till säkerhetsmarginalsberäkningar, aktiveringerstid.*

* Larmupptäckt och kommunikation

D.3.3 Släcktid

Släckningens effektivitet beror av:

1. Brandens storlek när släcksystemet aktiveras
2. Typ av släcksystem
3. Karaktären på släcksystemet
4. Den skyddade areans geometri
5. I vilken utsträckning som brandbelastningen är avskärmad från släcksystemet.

Då den brand som här beaktas är av mindre art antas själva släckningen gå ganska fort, detta kan anses vara ett icke konservativt antagande, men då det samtidigt antas att påverkan på komponenten, i form av strålning från flamma, rökgaslager och väggar, fortgår med oförminskad intensitet ända fram tills att branden är släckt så antas dessa antaganden ta ut varandra.

Släckning med hjälp av rätt dimensionerade och placerade sprinkler antas med utgångspunkt från finska släckförsök ta mellan 45 och 120 sekunder [34]. I tabell D.5 nedan anges de fördelningar över släcktiden som antagits för beräkning av säkerhetsmarginal.

Släcktid	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Sprinkler	RiskUniform(45;75)	RiskUniform(45;75)	RiskUniform(60;120)
Manuell 1	RiskUniform(45;75)	RiskUniform(45;75)	RiskUniform(60;90)

Tabell D. 5 *Indata till säkerhetsmarginalsberäkningar, släcktid.*

D.3.4 Kritisk tid

Den kritiska tiden bestäms genom att jämföra resultatet av yttemperaturen från kalkylblad i @RISK med komponentens kritiska temperatur. Med ett undantag så har respektive brandskyddsåtgärds inverkan på den kritiska tiden bestämts genom att variera förutsättningarna för yttemperaturberäkningarna enligt Appendix C. Undantaget är brandskyddsåtgärden brandskyddsmålning för vilken det har antagits att denna förlänger den kritiska tiden med 70% [38].

Kritisk yttemperatur för aktuella kablar har antagits vara 200°C [27].

Resultaten av @RISK-simuleringarna av yttemperaturen ger en sannolikhetsfördelning över temperaturen i varje tidssteg. Tiden då temperaturen överstiger 200°C blir därmed också en sannolikhetsfördelning. För att kunna använda denna fördelning vid beräkningen av yttemperatur måste den beskrivas matematiskt. Detta har gjorts genom att approximera denna till en triangelfördelning. Den kortaste tiden i denna triangelfördelning ansätts vara den tid då endast 5% av alla beräknade yttemperatur överstiger 200°C. Den mest sannolika tiden, det vill säga toppvärdet i triangelfördelningen, motsvarar den tid då hälften, 50%, av alla beräknade yttemperaturer överstiger 200°C. Det sista värdet i triangelvärdet är den tid då 95% av alla beräkningar resulterar i en yttemperatur som överstiger 200°C. Som indata vid beräkningar skrivs ovanstående som:

Fördelningsfunktion över kritisktid: RiskTriang(5%-fraktil;50%-fraktil;95%-fraktil)

Triangelfördelningarna för respektive brandskyddsåtgärd samt kombination av dessa presenteras i tabell D.6 nedan.

Åtgärd	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Fysisk avskiljning	600	600	600
Brandgasventilation	600	RiskTriang(137;600;600)	RiskTriang(180;600;600)
Brandskyddsmålning	RiskTriang(374;527;600)	RiskTriang(224;260;600)	RiskTriang(286;330;357)
Avståndsavskiljning	RiskTriang(300;600;600)	600	RiskTriang(189;211;231)
Brandgasventilation+ Brandskyddsmålning	600	RiskTriang(233;600;600)	RiskTriang(306;600;600)
Brandgasventilation+ Avståndsavskiljning	600	600	600
Brandgasventilation+ Brandskyddsmålning +Avståndsavskiljning	600	600	600
Brandskyddsmålning +Avståndsavskiljning	RiskTriang(510;600;600)	600	RiskTriang(321;359;393)
Ingen åtgärd	RiskTriang(220;310;600)	RiskTriang(132;260;600)	RiskTriang(168;194;210)

Tabell D. 6 *Indata till säkerhetsmarginalsberäkningar, kritisk tid (kritisk temperatur=200°C).*

D.4 Sannolikhetsfördelningar

Detektion av brand i brandcellen sker med hjälp av optiska rökdetektorer. Systemet är uppbyggt så att det ska klara enkelfel, det vill säga att det finns två av varandra oberoende detektionssystem. Sannolikheten för felfunktion bestäms genom att värdet felfrekvensen för ett enkelt detektionssystem kvadreras.

I felfrekvensen för sprinkler ingår allt från dimensionering och bristande service till misslyckad släckning.

I tabell D.7 presenteras de felfrekvenser som använts vid beräkningarna.

Brandskyddsåtgärd	**Felfrekvens [/behov]**
Rökdetektorer	0.02 [41]
Sprinkler (delugesystem)	0.028-0.06 [42, 43, 44]
Brandventilation	0.05-0.1 [45]
Brandvägg	0.001[42]
Branddörr	0.074 [42]
Brandskyddsfärg	0.2 [38]

Tabell D. 7 *Indata felfrekvenser.*

Ovanstående felfrekvenser har lett till valet av de sannolikhetsfördelningar som presenteras i tabell D.8 nedan.

Brandskyddsåtgärd	**Sannolikhetsfördelning för funktion**
Brandvägg	RiskTriang(0.9985,0.999,0.9995)
Branddörr	RiskTriang(0.92,0.926,0.93)
Brandgasventilation	RiskTriang(0.9,0.95,0.95)
Detektion	RiskTriang(0.975,0.98,0.985)
Sprinkler	RiskUniform(0.94,0.972)
Brandskyddsmålning	RiskUniform(0.75,0,80,0.85)
Manuell släckning	
Larmupptäckt och kommunikation	RiskUniform(0.9,0.95)
Till samlingsplatsen	RiskUniform(0.9,0.95)
Till rummet	RiskUniform(0.9,0.95)
Släckning	RiskUniform(0.9,0.95)

Tabell D. 8 *Sannolikhetsfördelningar*

D.5 Kostnader

De indata som använts i beräkningen av livscykelkostnaden för respektive brandskyddsalternativ presenteras i tabell D.9 nedan. Uppgifterna är hämtade från tidigare projekt på Ringhals och gäller alltså för befintlig byggnad. Priserna redovisas här i 1998 års prisnivå.

Brandskyddsåtgärd	Pris [Kr]	Totalkostnad [Kr]	LCC [Kr]
Fysisk avskiljning			
Livslängd, n, 20 år			
Vägg	650/m^2	20800	
Dörr	6000/st	6000	
Håltagning	3 500/m^2	14000	
Brandspjäll	100 000/st	100000	
Isolering	500/m	1000	
Underhåll	1000/år		
Summa			*155060*
Brandgasventilation			
Livslängd 20 år			
Fläkt	30 000/st	30000	
Håltagning	3 500/m^2	7000	
Isolering	500/m	2000	
Installation		20000	
Underhåll	2000/år		
Summa			*87444*
Sprinklersystem			
Livslängd 20 år			
Inköp/installation	5 000/m^2	320000	
Underhåll	90/detektor och år		
Summa			*322560*
Brandskyddsmålning			
Livslängd 10 år			
Inköp/installation	400/m^2	2000	
Underhåll år 1	1000		
Summa			*18222*
Avståndsavskiljning inkl. videoövervakning			
Livslängd 10 år			
Inköp CFAST objektiv	10 000/st	10000	
Montage etc.	15000	15000	
Underhåll	2000/år		
Summa			*78444*

Tabell D. 9 *Indata och resultat av kostnadsanalysberäkningar.*

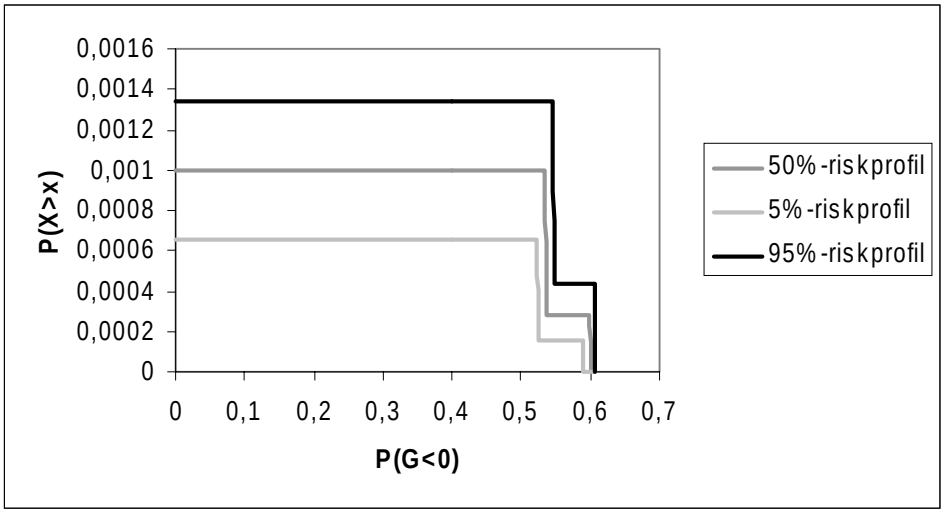
Appendix E

Resultat

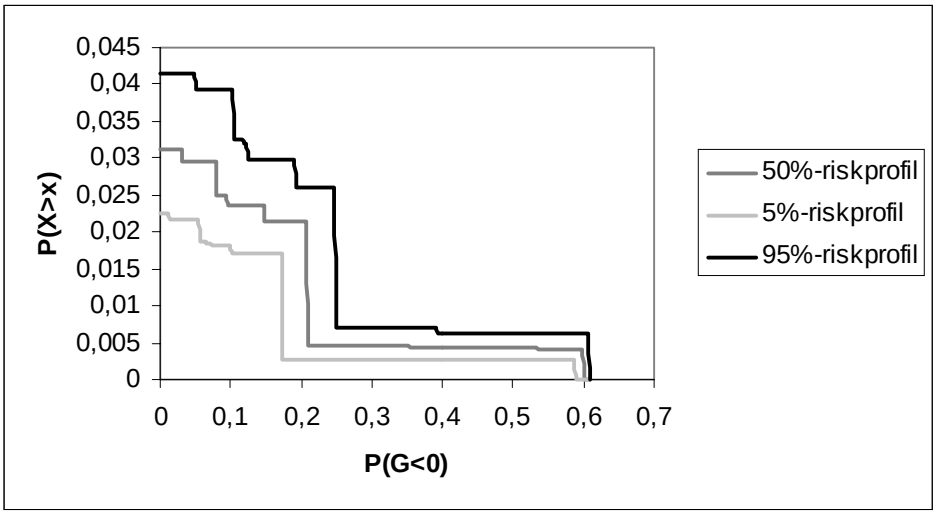
Innehållsförteckning:

E.1 RISKPROFILER.....111

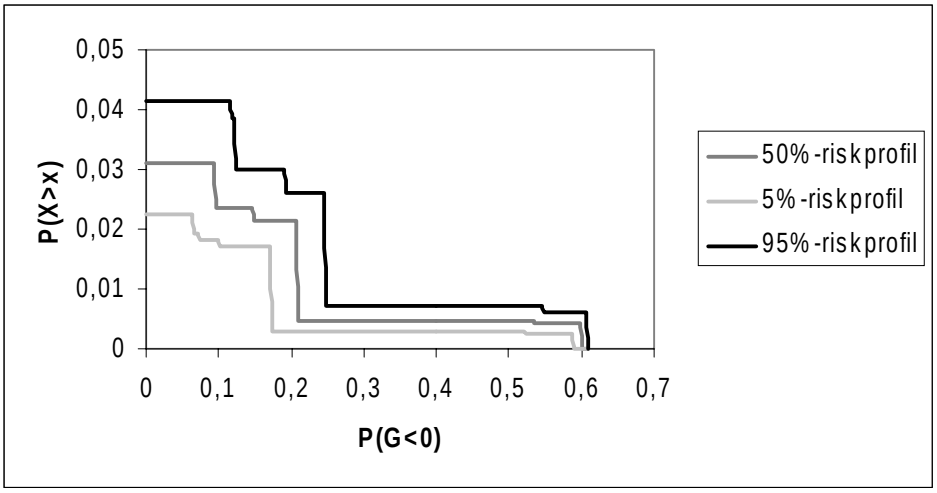
E.1 Riskprofiler



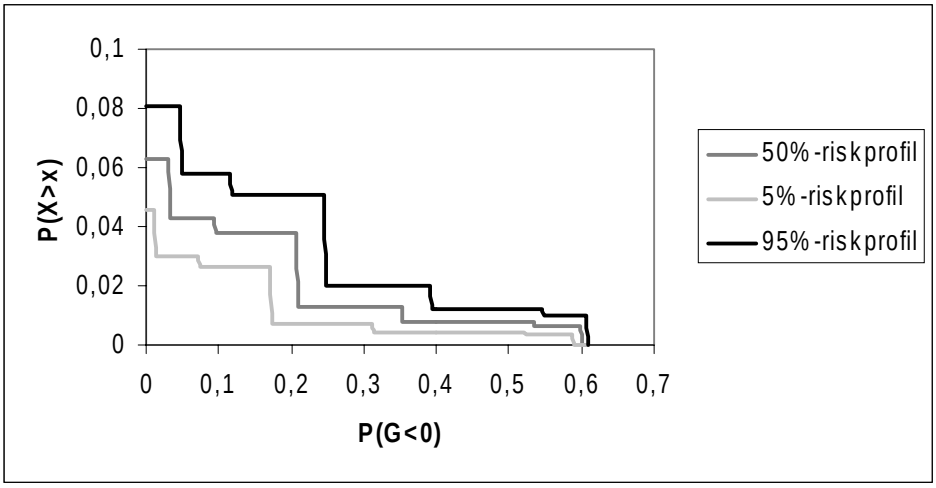
Figur E. 1 *Riskprofiler över alternativ 1.*



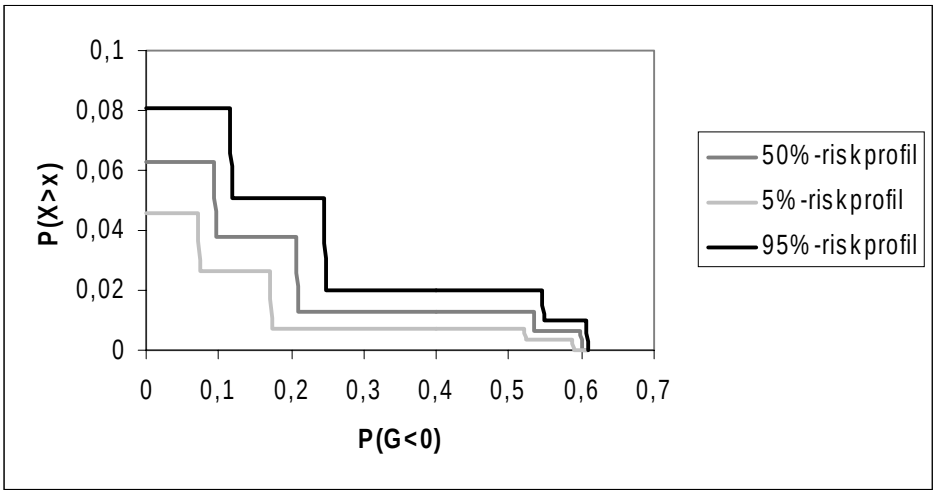
Figur E. 2 *Riskprofiler över alternativ 2.*



Figur E. 3 *Riskprofiler över alternativ 3.*



Figur E. 4 *Riskprofiler över alternativ 6.*



Figur E. 5 *Riskprofiler över alternativ 7.*