

Sammanfattning av fas 3 i projektet "Ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet"

Henrik Johansson

**Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden**

**Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Report 3125, Lund 2002

**Sammanfattning av fas 3 i projektet "Ekonomisk optimering
av det industriella brandskyddet"**

Henrik Johansson

Lund 2002

Sammanfattning av fas 3 i projektet ”Ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet”

Henrik Johansson

Report 3125

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--3125--SE

Number of pages: 27

Illustrations: Henrik Johansson

Keywords

Risk analysis, fire protection, expert judgement, bayesian networks, decision analysis, supersoft decision theory.

Sökord

Riskanalys, brandskydd, expertbedömningar, bayesianska nätverk, beslutsanalys, hypermjuk beslutsteori.

Abstract

Use of Bayesian networks for decision analysis concerned with investments in fire protection is discussed. It is shown how the networks can be used to generate a measure of risk and how such a measure can be updated when new information regarding the risk is received. Treatment of expert judgement in the present context of fire risk analysis is also discussed, and several methods for use of expert judgement being presented. The last part of the report deals with use of supersoft decision theory (SSD) within the area of decision analysis concerned with investments in fire safety.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2002.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

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

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

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

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

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

Sammanfattning

Fas 3 i projektet "Ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet" innehåller tre områden. Det första området handlar om hur man kan använda Bayesianska nätverk för tillämpningar som har att göra med riskhantering i industrier. Bayesianska nätverk kan användas för att beräkna den förväntade skadekostnaden, vilket är ett bra mått på risken i en byggnad. Fördelen med att använda Bayesianska nätverk för detta i stället för något annat beräkningssätt är att de Bayesianska nätverken enkelt kan användas för att skapa dynamiska modeller för kontinuerlig uppföljning av risken i en specifik byggnad. Med en dynamisk modell avses en modell som kan uppdateras på ett enkelt sätt med hjälp av statistiska metoder då ny information inkommer. För att presentera risken som skattas med hjälp av ett Bayesianskt nätverk kan flera olika riskmått användas. I rapporten presenteras fyra sådana, varav förväntad skadekostnad och risk-justerad förväntad skadekostnad är två. En mer ingående presentation av arbetet finns i uppsatsen "On the Use of Bayesian Networks in Fire Risk Management" (Johansson, 2002a) som ingår i detta projekt.

Det andra området som behandlats i projektet är användning av experter i samband med den typ av risk- och beslutsanalys som presenterats tidigare i projektet. Detta är ett område som är angeläget att undersöka eftersom det i många fall saknas empirisk information rörande sannolikheter som man är intresserad av när man gör riskanalyser. I rapporten presenteras tre olika sätt att hantera expertutlåtanden i riskanalyser. Två av sätten bygger på att experten/experterna kan beskriva sin skattning rörande en sannolikhet med hjälp av en fördelning, medan det sista sättet bygger på att experten bara ger en punktskattning (ett värde) som sedan används av beslutsfattaren för att justera hans/hennes skattning av den aktuella sannolikheten. Dessa sätt att använda expertutlåtanden fungerar tillsammans med den metodik för riskanalyser och beslutsanalyser som presenterats i det aktuella projektet. En ingående beskrivning av hantering av expertutlåtanden finns i uppsatsen "On the Use of Bayesian Methods in Performance-Based Design and Decision Analysis Regarding Fire Safety" (Johansson, 2002b) som ingår i det aktuella projektet.

Det sista området som berörts är hypermjuk beslutsteori applicerad på investeringar i brandskydd. I BRANDFORSKs regi (Projektnummer: 104-991) har ett datorprogram utvecklats som kan använda hypermjuk beslutsteori för att analysera olika investeringar i brandskydd. Hypermjuk beslutsteori innebär att man inte behöver ange konsekvenser och sannolikheter exakt i sin analys, vilket betyder att man kan utföra en analys på mindre tid än med traditionella metoder och med hjälp av mindre information. I rapporten visas hur hypermjuk beslutsteori kan appliceras på ett exempel som redovisats tidigare i projektet. Exemplet rör en investering i ett sprinklersystem i en byggnad som tillhörde ABB. Exemplet analyseras dels med den metod som använts tidigare, men också med hjälp av hypermjuk beslutsteori. En jämförelse av de två metoderna presenteras. Användning av hypermjuk beslutsteori för beslutsanalyser angående brandskydd beskrivs också i uppsatsen "Supersoft Decision Theory in Fire Risk Management" (Johansson & Malmnäs, 2002), vilken ingår i det aktuella projektet.

Summary

The last phase of the project "Economic optimisation of industrial fire protection" (project number: 105-001) is concerned with three areas. The first area is the use of Bayesian networks for fire risk management in buildings. Bayesian networks can be used to calculate the expected monetary loss due to fire during a specific period of time, which is a good measure of risk. The benefit of using Bayesian networks for the calculation of the expected value, instead of any other method, is that Bayesian networks can easily be used to create dynamic models for continuous measurement of risk. A dynamic model is a model that can be easily updated using new fire statistics from the building of interest. In order to present the fire risk in a building, several measures can be calculated using a Bayesian network. In the report, four such measures are presented. Two of these are the expected loss and the risk-adjusted expected loss. A more comprehensive account of Bayesian networks and risk measurement can be found in the paper "On the Use of Bayesian Networks in Fire Risk Management" (Johansson, 2002a), which is a part of the present project.

The second area that is dealt with in this phase of the project is how to use expert judgements in the model used to analyse decisions regarding investments that has been developed in the project. This is an area of concern since one does not often have empirical information concerning the probabilities that one need in order to estimate the risk. Instead one needs to use the best available information and that could involve using experts in order to come up with estimations of probabilities. In the present report three methods that can be used to deal with expert judgment in the present context are presented briefly. Two of the methods assume that each expert can create a probability distribution that represents his/her belief regarding the parameter (a probability, for example) in question. The last method assumes that each expert can give a point estimate (single value) of the parameter in question and that the decision maker can use this point estimate in order to update his/her estimation of the parameter in question. All of these methods for using expert judgement works together with the model developed for analysing decisions to invest in fire protection that has previously been developed in the project. The paper "On the Use of Bayesian Methods in Performance-Based Design and Decision Analysis Regarding Fire Safety" (Johansson, 2002b), which is a part of the project, contains a comprehensive description of the use of expert judgement in the present context.

The last area that is dealt with is concerned with analysing fire safety investments using Supersoft decision theory (SSD). SSD is a decision theory that can be employed when the decision maker is very uncertain with respect to the decision problem. Using SSD involves assigning probabilities and consequences as intervals instead as exact values. In another project sponsored by the Swedish Fire Research Board (project number: 104-991) called "Supersoft decision theory and economic optimisation of industrial fire protection", a computer program that can be used to evaluate decision alternatives in terms of SSD has been developed. In the report it is shown how SSD can be used to analyse investments in fire safety. A comparison between SSD and the approach for analysing investments in fire safety previously used in the project is also presented. This work is presented in more detail in the paper "Supersoft Decision Theory in Fire Risk Management" (Johansson & Malmnäs, 2002).

Förord

Denna rapport är en sammanfattning av fas 3 (projektnummer: 105-001) i projektet ”Ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet”, vilket finansieras av BRANDFORSK. Som hjälp vid framtagandet av denna rapport har funnits en referensgrupp bestående av följande personer:

Lars Nilsson, Kammarkollegiet
Nils Fröman, Pharmacia & Upjohn
Ingemar Grahn, Avesta Polarit
Anders Olsson, Försäkringsbolaget Zurich
Bo Sidmar, Asea Brown Boveri AB
Michael Härte, Saab Military Aircraft
Bo Andersson, Räddningsverket
Sven Erik Magnusson, LTH Brandteknik
Björn Lindfors, SKF Reinsurance Comp Ltd
Jan-Erik Johansson, Stora Risk Management
Liselotte Jonsson, Theorells
Per-Erik Malmnäs, Stockholms universitet

	Sida
Sammanfattning	i
Summary	ii
Förord	iii
1. Inledning	1
1.1. BAKGRUND	1
1.1.1. <i>Bayesianska nätverk</i>	1
1.1.2. <i>Användning av expertskattningar</i>	1
1.1.3. <i>Hypermjuk beslutsteori</i>	1
2. Bayesianska nätverk	3
2.1. UPPDATERING AV BAYESIANSKA NÄTVERK	4
2.2. PRAKTISK ANVÄNDNING AV BAYESIANSKA NÄTVERK	8
2.3. RISKMÅTT	10
2.4. SLUTSATSER	13
3. Användning av expertutlåtanden i riskanalyser	14
3.1. BESKRIVNING AV OSÄKERHET RÖRANDE EN SKATTNING	14
3.2. METODER FÖR ATT KOMBINERA INFORMATION FRÅN EXPERTER	14
3.3. SLUTSATSER	17
4. Hypermjuk beslutsteori	19
4.1. KORT INTRODUKTION	19
4.2. JÄMFÖRELSE MELLAN HYPERMJUK BESLUTSTEORI OCH BAYESIANSK BESLUTSTEORI	20
4.3. SLUTSATSER	24
5. Referenser	26
Bilaga 1: Litteratur som producerats i projektet, eller som ett resultat av projektet	27

1. Inledning

Fas III är den sista delen i projektet ”Ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet” som har finansierats av BRANDFORSK. Projektet har haft som målsättning att ta fram metoder som gör det möjligt att värdera riskreduceringen som åstadkoms vid investeringar i brandskydd. Genom att kunna göra detta kan olika brandskyddsalternativ i en industri jämföras på ett rationellt sätt och det bästa alternativet, sätt ut beslutsfattarens synvinkel, kan väljas.

Under de tre år som projektet pågått har följande producerats i projektet, eller som ett resultat av det: 6 rapporter, 1 licentiavhandling samt 6 uppsatser som har presenterats, eller kommer att presenteras, vid internationella konferenser eller i internationella tidskrifter. Alla publikationer finns sammanfattade i bilaga 1.

Den sista delen av projektet som sammanfattas i denna rapport handlar om Bayesianska nätverk, användning av expertutlåtanden, samt hypermjuk beslutsteori.

1.1. Bakgrund

1.1.1. Bayesianska nätverk

I företag finns ett intresse av att övervaka risker i verksamheten så att man kan upptäcka eventuella negativa förändringar och agera med förebyggande åtgärder innan en risk resulterar i en allvarlig skada. För detta ändamål lämpar sig Bayesianska nätverk.

Avsikten med att använda Bayesianska nätverk för kontinuerlig mätning av brandrisken i en byggnad är att Bayesianska nätverk (1) kan användas för att skatta brandrisken i en specifik byggnad och (2) enkelt kan uppdateras kontinuerligt med hjälp av statistik från byggnaden som är av intresse.

De Bayesianska nätverken kan också användas för att generera riskmått, vilka är användbara därför att de är enkla att presentera och de kan registreras varje månad eller år också på så vis ge en indikation om brandrisken i en specifik byggnad ökar eller ej.

1.1.2. Användning av expertskattningar

Ofta finns dålig tillgång till specifik statistik rörande den byggnad som man är intresserad av att skatta brandrisken i. Detta innebär att man till stor del måste förlita sig på expertbedömningar i analyserna och det finns ett behov av att kunna behandla dessa bedömningar på ett enhetligt och logiskt vis.

Syftet med den del som handlar om användning av expertskattningar i detta projekt är att kunna finna en eller flera metoder för användning av expertskattningar som passar bra ihop med den metodik som hittills använts i det aktuella projektet.

1.1.3. Hypermjuk beslutsteori

I BRANDFORSKs regi har en programvara som kan användas för att analysera investeringar i brandskydd med hjälp av hypermjuk beslutsteori utvecklats (projektnummer: 104-991). Hypermjuk beslutsteori innebär att investeringar kan analyseras med hjälp av en mindre mängd information än vad som behövs för att göra det med den metod som hittills används i det aktuella projektet. Syftet med den del i projektet som handlar om hypermjuk beslutsteori

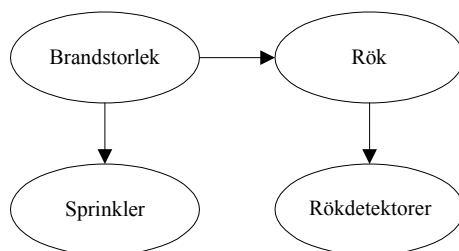
är att applicera metoden på ett beslutsproblem som tidigare analyserats och sedan göra en jämförelse mellan hypermjuk beslutsteori och den metod som hittills använts i projektet.

2. Bayesianska nätverk

När man är intresserad av brandrisken i en byggnad, eller när man vill göra en analys av vilket brandskyddsalternativ som är det bästa i en specifik byggnad är sannolikheterna för olika brandscenarier mycket viktiga att kunna skatta.

Bayesianska nätverk är ett beräkningsverktyg som kan användas för att beräkna dessa sannolikheter i en specifik byggnad. Bayesianska nätverk består av noder, vilka binds samman av länkar. Noderna representerar variabler som kan befinna sig i olika tillstånd och länkarna visar vilka noder (variabler) som påverkar varandra. I Figur 1 visas ett exempel på ett Bayesianska nätverk som innehåller ett antal noder som har anknytning till en brands utveckling i en byggnad. I figuren framgår att variabeln brandstorlek påverkar huruvida sprinklersystemet har utlöst eller ej, samt hur kraftig rökutvecklingen är. Variabeln Rök påverkar i sin tur huruvida rökdetektorerna i byggnaden har detekterat branden.

Varje nod i nätverket är förknippad med en sannolikhetstabell, vilken visar sannolikheten att variabeln i fråga skall befinna sig i ett viss tillstånd, givet att nodens *föräldrar* befinner sig i vissa givna tillstånd. En nods föräldrar är de noder från vilka länkar leder till den aktuella noden.



Figur 1 Bayesianskt nätverk som visar hur variablerna Brandstorlek, Sprinkler, Rök och Rökdetektorer påverkas av varandra.

Ett exempel på en sannolikhetstabell illustreras i Tabell 1, där man kan se att variabeln Rök kan anta fyra olika tillstånd, ”Ingen synlig rök”, ”Rök i rummet där branden börjat”, ”Rök i brandcellen där branden börjat”, samt ”Rök utanför byggnaden”. Man kan också se att den enda *förälder-noden* som påverkar Rök-noden är noden som heter Brandstorlek. Vidare kan man i tabellen se att om variabeln Brandstorlek exempelvis befinner sig i tillståndet ”Ingen brand” är sannolikheten att det inte finns någon synlig rök ganska hög (0,95).

Tabell 1 Sannolikhetstabell för variabeln Rök.

Rök	Brandstorlek			
	Ingen brand	Begränsad till ett objekt	Begränsad till ett rum	Begränsad till en brandcell
Ingen synlig rök.	0,95	0,1	0	0
Rök i rummet där branden börjat.	0,04	0,75	0,6	0
Rök i brandcellen där branden börjat.	0,01	0,14	0,35	0,9
Rök utanför byggnaden.	0	0,01	0,05	0,1

Med hjälp av de räkneregler som existerar för Bayesianska nätverk kan man beräkna sannolikheten att de olika variablerna samtidigt befinner sig i olika tillstånd. Detta kan utnyttjas för att beräkna sannolikheten för ett visst brandscenario.

2.1. Uppdatering av Bayesianska nätverk

När man skapat ett Bayesianska nätverk med tillhörande sannolikhetstabeller som representerar möjliga brandscenarier i en byggnad kan man använda brandstatistik från byggnaden för att uppdatera nätverket.

Detta är en mycket värdefull egenskap hos de Bayesianska nätverken, vilken är användbar när man avser använda dem för långsiktigt riskhanteringsarbete. Hur detta kan genomföras kommer att beskrivas i avsnitt 2.3, men för att ge en bakgrund till detta måste man först förstå hur uppdateringen av ett Bayesianska nätverk fungerar.

Man skiljer mellan hård och mjuk information när det gäller uppdatering av Bayesianska nätverk. Hård information innebär att man *vet* vilket tillstånd som en specifik variabel befinner sig i. Mjuk information innebär att man inte vet vilket tillstånd en specifik variabel befinner sig i, men informationen innebär att *sannolikheten* att variabeln befinner sig i ett specifikt tillstånd kan förändras på grund av informationen.

Uppdateringen av ett Bayesianska nätverk med hjälp av hård eller mjuk information fungerar på liknande sätt. Här visas först hur uppdatering sker med hjälp av hård information.

Antag att en räddningsledare är på väg ut till en industribyggnad från vilken en person har ringt och meddelat att det brinner. Det Bayesianska nätverket i Figur 2 kan hjälpa honom/henne att dra slutsatser avseende huruvida det verkligen brinner i byggnaden. Nätverket består av tre noder/variabler, Brand (förkortas X_{Brand}), Rök (förkortas $X_{Rök}$), och Alarm (förkortas X_{Alarm}). Antag att variablerna bara kan finnas i två tillstånd, ”Ja” eller ”Nej”.



Figur 2 Enkelt Bayesianskt nätverk.

Eftersom larmet från byggnaden ringdes in av en person och alltså inte var ett automatiskt brandlarma bedömer räddningsledaren att sannolikheten att det faktiskt brinner i byggnaden är hög, vilket kan representeras av $P(X_{Brand}=Ja)=0,8$. Detta betyder att $P(X_{Brand}=Nej)=0,2$.

Om det brinner i byggnaden är det sannolikt att det är rök i den stora produktionshallen där rökdetektorerna är placerade. Detta kan skrivas som $P(X_{Rök}=Ja | X_{Brand}=Ja)=0,9$. Om det inte brinner så bedömer räddningsledaren att det kan finnas andra anledningar till att det är rök i produktionshallen, exempelvis på grund av överhettning av någon maskindel, och alltså är $P(X_{Rök}=Ja | X_{Brand}=Nej)$ inte lika med 0 utan i detta fallet bedöms denna sannolikhet vara 0,05. Vidare antar brandbefälet att om det är rök i produktionshallen är sannolikheten hög att alarmklockan på utsidan av byggnaden ringer, detta skrivs som $P(X_{Alarm}=Ja | X_{Rök}=Ja)=0,95$. Om det inte är rök i produktionshallen antar han/hon att sannolikheten att alarmklockan ändå ringer är liten, $P(X_{Alarm}=Ja | X_{Rök}=Nej)=0,01$. De sannolikhetsskattningar som befälhavaren gör sammanfattas i Tabell 2, Tabell 3 och Tabell 4.

Tabell 2 Sannolikhetsstabell för variabeln Brand.

i	P($X_{\text{Brand}} = i$)
Ja	0,8
Nej	0,2

Tabell 3 Sannolikhetsstabell för variabeln Rök.

i	P($X_{\text{Rök}} = i$)	
	$X_{\text{Brand}} = \text{Ja}$	$X_{\text{Brand}} = \text{Nej}$
Ja	0,9	0,05
Nej	0,1	0,95

Tabell 4 Sannolikhetsstabell för variabeln Alarm.

i	P($X_{\text{Alarm}} = i$)	
	$X_{\text{Rök}} = \text{Ja}$	$X_{\text{Rök}} = \text{Nej}$
Ja	0,95	0,01
Nej	0,05	0,99

De sannolikheter som redovisas i tabellerna ovan är mått på hur troliga diverse händelser är enligt räddningsledaren, baserat på den information som han/hon har tillgänglig. Till exempel så är sannolikheten att det brinner i byggnaden 0,8, vilket betyder att räddningsledaren bedömer det som troligt att det brinner, men att han/hon ännu inte kan vara riktigt säker. Dessa sannolikheter kan ändras om räddningsledaren erhåller ny information.

Antag att räddningsledaren får ett radiomeddelande från larmcentralen och får reda på att en granne till industribyggnaden har ringt och meddelat att alarmklockan på utsidan av byggnaden ringer. Denna information bör öka räddningsledarens uppskattning av sannolikheten att det brinner, men frågan är hur mycket. Det Bayesianska nätverket i Figur 2 kan användas för att ta reda på hur mycket informationen bör öka sannolikheten att hypotesen att det brinner i byggnaden är korrekt.

Antag att räddningsledaren litar på informationen om alarmklockan. I så fall är $P(X_{\text{Alarm}} = \text{Ja}) = 1$, och detta kan användas för att uppdatera de övriga sannolikheterna i nätverket. När information skall fortplantas bakåt i ett nätverk (motsatt länkarnas riktning) använder man Bayes sats för att uppdatera sannolikheterna och eftersom informationen från Alarm-noden skall uppdatera Rök-noden och Brand-noden måste Bayes sats användas (se Figur 2). Sannolikheten att det är rök i produktionshallen givet att alarmklockan ringer kan beräknas enligt ekvation (1).

$$P(X_{\text{Rök}} = \text{Ja} | X_{\text{Alarm}} = \text{Ja}) = \frac{P(X_{\text{Alarm}} = \text{Ja} | X_{\text{Rök}} = \text{Ja}) \cdot P(X_{\text{Rök}} = \text{Ja})}{\sum_i P(X_{\text{Alarm}} = \text{Ja} | X_{\text{Rök}} = i) \cdot P(X_{\text{Rök}} = i)} \quad i = \text{Ja}, \text{Nej} \quad (1)$$

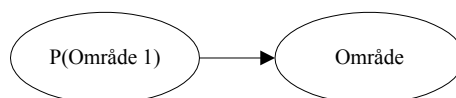
$P(X_{\text{Alarm}} = \text{Ja} | X_{\text{Rök}} = \text{Ja}) = 0,95$ får man från Tabell 4 och $P(X_{\text{Rök}} = \text{Ja}) = 0,73$, vilket kallas apriorisannolikheten, beräknas genom att använda Tabell 2 och Tabell 3. $P(X_{\text{Alarm}} = \text{Ja} | X_{\text{Rök}} = \text{Nej}) = 0,01$ kan erhållas från Tabell 4 och $P(X_{\text{Rök}} = \text{Nej}) = 0,27$ kan beräknas genom att använda Tabell 2 och Tabell 3. Sannolikheten att det brinner i byggnaden efter att hänsyn till den nya informationen tagits, $P(X_{\text{Rök}} = \text{Ja} | X_{\text{Alarm}} = \text{Ja})$, är 0,996. Eftersom 0,996 är en

mycket hög sannolikhet kan man i säga att räddningsledaren i praktiken nu är helt säker på att det brinner.

Detta enkla exempel visar hur Bayesianska nätverk kan användas för att resonera för att fatta beslut när osäkerhet råder. Visserligen hade förmodligen räddningsledaren i exemplet ovan nått samma slutsats utan det Bayesianska nätverket, men i mer komplicerade situationer skulle ett nätverk kunna vara användbart för att snabbt ge information om hur sannolikt olika händelseutvecklingar är, t.ex. vid olyckor som involverar farligt gods. Man bör observera att det som skiljer den information som man kan erhålla från ett Bayesianskt nätverk och ett så kallat expertsystem är att expertsystemet i regel ger konkreta utlåtanden om hur man bör hantera en osäker situation, eller ett förslag på vilket fenomen som orsakar den information som man observerar. Bayesianska nätverk ger i stället en sannolikhetsuppskattning baserat på den information som experter har bidragit med till nätverket och den information som observeras. Två exempel på områden där Bayesianska nätverk används inom är militära tillämpningar för att identifiera mål i luften, och medicinska tillämpningar för att identifiera sjukdomar. Det är sannolikt att Bayesianska nätverk även kan användas inom räddningstjänstillämpningar för att förse en räddningsledare med ett bra beslutsunderlag i en akut situation. Det är dock inte på denna tillämpning som denna rapport kommer att fokusera. Här kommer i stället fokus att vara på hur Bayesianska nätverk kan användas inom långsiktigt riskhanteringsarbete i exempelvis ett företag.

När man intresserad av att använda Bayesianska nätverk för riskhantering i stället för att erhålla beslutsunderlag i en akut situation, vilket var fallet i exemplet som diskuterades ovan, måste man kunna ta hänsyn till så kallad *mjuk information*. Mjuk information innebär att man erhåller information som berör någon variabel i nätverket, men informationen är inte tillräcklig för att veta i vilket tillstånd som variabeln befinner sig i. Däremot kan informationen användas för att uppdatera sannolikhetstabellen som är förknippad med den aktuella variabeln.

Antag till exempel att man är intresserad av brandrisken i en byggnad och att man har skapat en modell i ett Bayesianskt nätverk för hur en brand kan utvecklas. Om man är osäker på värdet av en sannolikhet i modellen, exempelvis sannolikheten att en brand uppstår i en viss del av byggnaden, kan man representera den sannolikheten med en variabel i det Bayesianska nätverket. Figur 3 illustrerar hur detta kan ske. I det Bayesianska nätverket i figuren finns endast två noder, en nod som representerar i vilket område en brand uppstår ("Område") och en nod som representerar sannolikheten att branden uppstår i Område 1 ("P(Område 1)").



Figur 3 Enkelt Bayesianskt nätverk som visar hur osäkerhet rörande en sannolikhet kan representeras.

Antag att det bara finns två områden i den aktuella byggnaden och att personen som skapat nätverket har mycket lite information om hur troligt det är att en brand uppstår i de respektive områdena. I detta fallet kan han/hon representera denna brist av information genom sannolikhetstabellen i Tabell 5, vilken representerar noden $P(\text{Område } 1)$. Där framgår att alla tillstånd som variabeln $P(\text{Område } 1)$ kan vara i, d.v.s. 0,1; 0,2; 0,3; etc., har tilldelats lika sannolikhet (1/9).

Tabell 5 Sannolighetstabell för noden $P(\text{Område 1})$.

$P(\text{Område 1})$	Sannolikhet
0,1	1/9
0,2	1/9
0,3	1/9
0,4	1/9
0,5	1/9
0,6	1/9
0,7	1/9
0,8	1/9
0,9	1/9

Tabell 5 innebär att det är lika troligt att en brand uppstår i Område 1 som i Område 2.

Sannolighetstabellen för noden Område illustreras i Tabell 6.

Tabell 6 Sannolighetstabell för noden Område 1.

	$P(\text{Område 1})$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Område 1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Område 2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Det intressanta med mjuk information är hur den kan ändra en sannolighetstabell och därmed också ändra exempelvis sannolikheten att en brand uppstår i Område 1 i exemplet ovan. Antag att man i byggnaden som representeras av nätverket i Figur 3 har observerat 1 brand som uppstod i Område 1. Denna information är *mjuk* eftersom den inte innebär att man med säkerhet vet att nästa brand också kommer att uppstå i Område 1. Informationen kan användas för att uppdatera sannolighetstabellen som hör till variabeln $P(\text{Område 1})$. Denna uppdatering sker genom att man använder Bayes sats för att beräkna de så kallade posteriori-sannolikheterna. Dessa sannolikheter beskriver hur troligt det är att variabeln $P(\text{Område 1})$ har ett specifikt värde efter att hänsyn till den nya informationen (1 brand uppstod i Område 1) tagits. För att beräkna posteriori-sannolikheterna måste man veta hur sannolikt det var att variabeln i fråga hade ett visst värde innan man fick den nya informationen. I exemplet ovan var denna sannolikhet 1/9 för alla värden (se Tabell 5). Dessutom måste man också veta hur sannolikt det är att man skulle observerat den nya informationen *givet* att variabeln i fråga har ett specifikt värde. Denna sannolikhet skulle i detta fall kunna beräknas med hjälp av en Binomialfördelning, men eftersom bara en brand inträffat behöver man inte använda denna fördelning utan den sökta sannolikheten kan fås från Tabell 6. I denna tabell kan man utläsa sannolikheten att en brand uppstår i Område 1, givet att $P(\text{Område 1})$ har ett specifikt värde. Uppdateringen av den första sannolikheten i Tabell 5 med hjälp av Bayes sats finns beskriven nedan. Resultatet får samtliga sannolikheter presenteras i Tabell 7.

$$P(P(\text{Område1}) = 0,1|E) = \frac{P(E|P(\text{Område1}) = 0,1) \cdot P(P(\text{Område1}) = 0,1)}{\sum_i P(E|P(\text{Område1}) = i) \cdot P(P(\text{Område1}) = i)} = \frac{0,1 \cdot 0,11}{0,5} = 0,022 \quad i = 0,1; 0,2; \dots; 0,9$$

Tabell 7 Posteriori-sannolikheter för variabeln $P(\text{Område 1})$.

$P(\text{Område 1})$	Sannolikhet
0,1	0,022
0,2	0,044
0,3	0,067
0,4	0,089
0,5	0,111
0,6	0,133
0,7	0,156
0,8	0,178
0,9	0,200

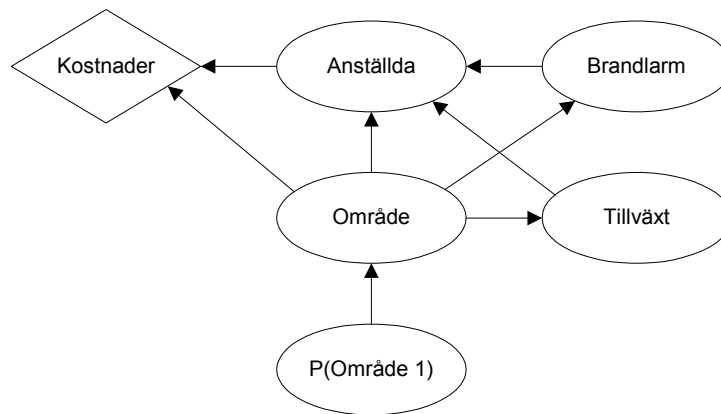
I Tabell 7 framgår att efter att en brand observerats i Område 1 har den ursprungliga fördelningen för parametern $P(\text{Område 1})$ (se Tabell 6) ändrats mycket. Man bör vara medveten om att även om den ursprungliga fördelningen ändrades mycket på grund av att en brand uppstod så kan den nya fördelningen mycket väl ändras mycket nästa gång en brand inträffar. Detta beror på att en eller två bränder är ganska lite för att kunna bestämma sannolikheten att en brand uppstår i ett visst område, för att göra det krävs mer bränder. Det är också relevant att påpeka vikten av valet av den ursprungliga fördelningen, den så kallade apriori-fördelningen. Om man väljer en likformig apriori-fördelning, som gjordes i exemplet ovan, innebär detta att den brandstatistik som man erhåller från byggnaden blir mycket dominerande för utseendet på den resulterande fördelningen, den så kallade posteriori-fördelningen. Om man däremot valt en apriori-fördelning som varit mer centrerad omkring exempelvis $P(\text{Område 1}) = 0,5$ hade inte *en* brand ändrat fördelningen lika mycket. I exemplet som diskuterades ovan är det troligt att man i verkligheten skulle kunnat komma fram till en mer specifik apriori-fördelning eftersom det ofta går att skaffa sig kunskap, exempelvis genom generell statistik, om var det är mest sannolikt att bränder uppkommer i en byggnad. I praktiska tillämpningar är det viktigt att en känslighetsanalys genomförs där effekten av att olika apriori-fördelningar används dokumenteras.

Om de två noderna i Figur 3 varit en del av ett större Bayesianskt nätverk skulle ändringen av sannolikhetstabellen för noden $P(\text{Område 1})$ påverkat resten av nätverket.

2.2. Praktisk användning av Bayesianska nätverk

Från ett riskhanteringsperspektiv är Bayesianska nätverk intressanta av flera skäl. Den grafiska presentationen av modellen som används för att representera brandförlopp i en byggnad är lätt att förstå. Man kan snabbt se vilka variabler som man tagit hänsyn till i modellen och man kan också se hur variablerna påverkar varandra. Vidare kan Bayesianska nätverk användas för att beräkna en sannolikhetsfördelning som är definierad över samtliga skadeutfall som man beaktar. Detta kan naturligtvis också göras med hjälp av händelseträd, men Bayesianska nätverk har fördelen att de enkelt kan uppdateras då ny information erhålls och det är också möjligt att representera osäkerhet rörande till exempel en sannolikhet i ett Bayesianskt nätverk. Detta är betydligt svårare ett åstadkomma i praktiken då man använder händelseträd för att modellera möjliga brandscenarier.

För att exemplifiera hur Bayesianska nätverk kan användas för riskhantering inom brandområdet kommer ett fiktivt exempel att användas. I detta exempel, som illustreras i Figur 4, används även en nod som representerar kostnader. När man använder sådana konsekvensnoder kallas nätverken för Influens diagram.



Figur 4 Influens diagram som representerar möjliga brandscenarier i en byggnad.

I Influens diagrammet kan man se att fem variabler påverkar utfallet av en brand, *Område*, *P(Område 1)*, *Anställda*, *Brandlarm* och *Tillväxt*. Variabeln *Område* representerar i vilket område som branden börjar. I exemplet antas att det bara finns två områden i byggnaden. Variabeln *Tillväxt* representerar brandens tillväxthastighet och det antas att endast två tillväxthastigheter är möjliga, snabb och långsam. Variabeln *Brandlarm* representerar huruvida brandlarmet detekterar branden och variabeln *Anställda* representerar huruvida de anställda i byggnaden lyckas släcka branden eller ej. Variabeln *P(Område)* representerar osäkerhet rörande sannolikheten att en brand uppstår i Område 1.

Sannolikhetstabellerna för de olika variablerna presenteras i Tabell 8, Tabell 9 och Tabell 10.

Tabell 8 Sannolikhetstabell för noden *Tillväxt* i Figur 4.

	Område 1	Område 2
Långsam	0.7	0.9
Snabb	0.3	0.1

Tabell 9 Sannolikhetstabell för noden *Brandlarm* i Figur 4.

	Område 1	Område 2
Detektion	0.95	0.95
Ingen Detektion	0.05	0.05

Tabell 10 Sannolikhetstabell för noden *Anställda* i Figur 4.

Potential	Långsam				Snabb			
Detektion	Ja		Nej		Ja		Nej	
Område	1	2	1	2	1	2	1	2
Släcker	0.99	0.99	0.8	0.9	0.7	0.8	0.2	0.5
Släcker inte	0.01	0.01	0.2	0.1	0.3	0.2	0.8	0.5

Om man undersöker sannolikhetstabellerna ser man att om branden uppstår i Område 1 är sannolikheten högre att branden har en snabb tillväxthastighet. Man kan också se att sannolikheten att brandlarmet detekterar branden är lika i de båda områdena. Av Tabell 10 framgår att sannolikheten att de anställda släcker branden varierar mellan 0,2 och 0,99 beroende på var branden uppstår, dess tillväxthastighet, och huruvida brandlarmet detekterar branden.

Förutom sannolikhetstabellerna som redovisats ovan finns även en konsekvenstabell som hör till noden Kostnader i Figur 4. Denna tabell redovisas i Tabell 4.

Tabell 11 Konsekvenstabell som hör till noden Kostnader i Figur 4.

Område	Område 1		Område 2	
Anställda	Släcker	Släcker inte	Släcker	Släcker inte
Kostnader (SEK)	0	100.000	10.000	1.000.000

I och med att en konsekvensnod finns i Influens diagrammet är det möjligt att beräkna den förväntade skadekostnaden, givet att en brand uppstår, med hjälp av nätverket. För exemplet ovan är den förväntade skadekostnaden per brand 24700 SEK.

Den förväntade skadekostnaden vid en brand är något som tidigare i projektet beräknats med hjälp av händelseträdet. En viktig skillnad när man använder Influens diagram är att man kan göra kontinuerliga uppdateringar av den förväntade skadekostnaden genom en begränsad arbetsinsats. Denna egenskap är något som kan utnyttjas för att kontinuerligt mäta brandrisken i en specifik byggnad.

2.3. Riskmått

Risk är ett komplext begrepp och om man försöker mäta risk, måste man först definiera begreppet risk. I denna rapport kommer Kaplan's (1997) definition av risk att användas. Detta innebär att risk betraktas som svaret på frågorna: "Vad kan hända?", "Hur sannolikt är det?" och "Vad blir konsekvenserna?". För att svara på frågorna föreslår Kaplan att man använder tre parametrar, S_i , L_i och C_i . S_i är en beskrivning av ett olycksscenario, till exempel ett brandscenario, L_i beskriver hur sannolikt just det scenariot är och C_i beskriver konsekvenserna av det aktuella scenariot. Risk definieras som den fullständiga uppsättningen av S , L och C , vilket kan skrivas som $\langle \{S, L, C\} \rangle_c$ där det nersänkta c:et står för "complete".

Att presentera $\langle \{S, L, C\} \rangle_c$ på ett lättbegripligt sätt är inte lätt om man är intresserad av komplexa situationer med många möjliga olycksscenarioer. Det kanske vanligaste sättet att presentera risk på är att använda så kallade riskprofiler. Detta innebär att man använder $\langle \{S, L, C\} \rangle_c$ för att skapa en sannolikhetsfördelning som är definierad för de möjliga konsekvenserna. Vanligtvis uttrycks sannolikhetsfördelningen som en komplementär kumulativ sannolikhetsfördelning. Exempel på sådana fördelningar har presenterats i rapporten "Värdering av risk" (Räddningsverket, 1997). En sådan riskprofil presenterar en hel del av informationen som innefattas i $\langle \{S, L, C\} \rangle_c$, men om konsekvenser uppstår inom flera områden, exempelvis antal döda och monetära förluster, kan det vara svårt att använda riskprofiler för att representera risken. Riskprofiler kan också vara svåra att tolka och speciellt om man är intresserad av små förändringar av risken. Detta kan vara lättare att se om man använder sig av riskmått i form av enstaka tal.

De riskmått som föreslås i Johansson (2002a) är bland andra den Årliga förväntade skadekostnaden, den Årliga förväntade risk-justerade skadekostnaden. Den årliga förväntade skadekostnaden är det förväntade värdet av de kostnader som används i modellen för hur en brand kan utvecklas i en specifik byggnad. Detta riskmått tar inte hänsyn till eventuell riskaversion hos företaget (beslutsfattaren). Detta innebär att större skador ges samma "vikt" i beräkningen av det förväntade värdet som mindre, d.v.s. en brand som kostar 100 miljoner kr betraktas som hundra gånger värre än en som kostar 1 miljon kr. Om man vill ta hänsyn till riskaversion och således även ta hänsyn till beslutsfattarens värderingar av de olika skadeutfallen kan man beräkna den Årliga förväntade risk-justerade skadekostnaden. När man

beräknar detta riskmått krävs lite mera jobb än vid beräkningen av den Årliga förväntade skadekostnaden eftersom man också måste undersöka beslutsfattarens inställning till risk för att kunna genomföra beräkningarna.

Avsikten med dessa riskmått är att de skall kunna användas för att kontinuerligt mäta risken i en byggnad och att de skall vara lätta att presentera för personer som har ansvar för riskhantering. Naturligtvis kan man inte ge en helhetsbeskrivning av risken i byggnaden med ett enda riskmått, men om man använder ett antal är det troligare att man kan representera risken i byggnaden på ett godtagbart sätt. Förutom de två riskmått som nämnts ovan kan man också använda så kallade betingade förväntade skador (conditional expected losses) Haimes (1998). Denna typ av riskmått innebär att man bara intresserar sig för skador över en viss nivå, till exempel 100 kkr. Alla skador under denna nivå bortser man ifrån när man beräknar det förväntade värdet. Man kan också redovisa den förväntade frekvensen för skador större än en viss nivå, exempelvis 1 miljon kronor. Detta ger en uppfattning hur sannolik en stor brand i den aktuella byggnaden är.

Man bör notera att för att beräkna alla dessa riskmått använder man den ursprungliga definitionen av risk som utgångspunkt.

Tabell 12 Fyra riskmått med beskrivning.

Riskmått	Beskrivning
Förväntad skadekostnad (SEK)	Ett naturligt riskmått där små och stora konsekvenser vägs ihop baserat på hur sannolika de är.
Risk-justerad förväntad skadekostnad (SEK)	Ett riskmått där hänsyn till beslutsfattarens inställning till risk tas. Stora och små konsekvenser kan viktas olika i det slutliga riskmålet. Den beslutsteoretiska innebörden av detta värde är att beslutsfattare är beredd att betala denna summa för att undvika exponeringen från den aktuella riskkällan. För en mer detaljerad diskussion om detta, se Johansson (2002c).
Betingad förväntad skadekostnad (SEK)	Om en beslutsfattare inte är intresserad av små skador kan detta riskmått vara användbart. Genom att välja en skadenivå under vilken man bortser från alla skador innebär det att endast storskador påverkar riskmålet.
Frekvens för allvarliga olyckor (ggr/år)	Detta riskmått visar hur ofta man kan förvänta sig att en allvarlig skada inträffar.

För att illustrera hur denna typ av riskmått kan fungera som ett enkelt sätt att kontinuerligt mäta risken i en byggnaden under en tidsperiod kommer ett exempel att användas.

Antag att influensdiagrammet i Figur 4 representerar hur en brand i en specifik byggnad kan tänkas utvecklas. Eftersom parametern $P(\text{Område } 1)$ är den enda sannolikhet som är osäker i modellen (alla andra sannolikheter har angivits som exakta värden) är det endast mjuk information angående denna sannolikhet som kan användas för att uppdatera nätverket. Den information som man kan använda är information om var i byggnaden som olika bränder har börjat. Antag att det har uppkommit fyra bränder i byggnaden och att sannolikhetstabellen (Tabell 5) för $P(\text{Område } 1)$ uppdateras med hjälp av Bayes sats efter varje brand. I Tabell 13 illustreras i vilket område de olika bränderna uppkommit och i Tabell 14 redovisas hur

sannolikhetstabellen för $P(\text{Område 1})$ påverkas beroende på hur många bränder som uppkommit.

Tabell 13 Beskrivning av i vilket område de olika bränder har uppstått. 1 betyder att branden uppstod i det område som representeras av kolumnen där siffran står.

Brand	Område 1	Område 2
1	1	
2	1	
3		1
4	1	

Tabell 14 Sannolikhetstabellen för $P(\text{Område 1})$ beroende på hur många bränder som uppkommit.

P(Område 1)	Apriori	Sannolikhet			
		1 Brand	2 Bränder	3 Bränder	4 Bränder
0,1	0,111	0,022	0,004	0,011	0,002
0,2	0,111	0,044	0,014	0,039	0,013
0,3	0,111	0,067	0,032	0,076	0,038
0,4	0,111	0,089	0,056	0,116	0,078
0,5	0,111	0,111	0,088	0,152	0,127
0,6	0,111	0,133	0,126	0,175	0,176
0,7	0,111	0,156	0,172	0,178	0,209
0,8	0,111	0,178	0,225	0,155	0,208
0,9	0,111	0,200	0,284	0,098	0,148

I Tabell 14 kan man se att efter att 4 bränder uppkommit, varv tre i Område 1 och en i Område 2, är det mycket troligt att sannolikheten att nästa brand uppkommer i Område 1 är över 0,5. Detta kan man se i kolumnen "4 Bränder" där sannolikheten att $P(\text{Område 1}) < 0,5$ är 0,131.

Denna uppdatering av sannolikheten att en brand uppkommer i Område 1 påverkar naturligtvis det övriga nätverket och man kan genom att beräkna olika riskmått före och efter man uppdaterat med de nya information se vilken effekt den har på bedömningen av risken i byggnaden. I det exempel som används här kommer endast den förväntade skadekostnaden och den risk-justerade skadekostnaden att beräknas. För att beräkna den risk-justerade skadekostnaden måste man undersöka beslutsfattarens inställning till risk och skapa en så kallade nyttofunktion.

Effekten av att använda ny information för att uppdatera nätverket framgår av effekten som denna uppdatering har på riskmåten. Denna information redovisas i Tabell 15.

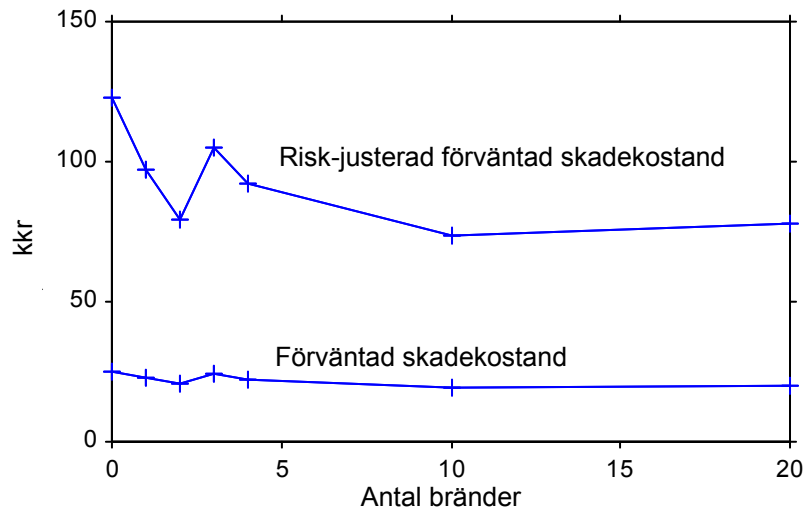
Tabell 15 Resultat från uppdatering av riskmåten.

	0 Bränder	1 Brand	2 Bränder	3 Bränder	4 Bränder
Förväntad skadekostnad (SEK per år)	24700	22700	20600	24200	22300
Risk-justerad förväntad skadekostnad (SEK per år)	123000	97000	79000	105000	92000

Om man även antar att det finns ytterligare information om var i byggnaden som bränder uppstår från ytterligare 16 bränder kan man se effekten av att hela tiden öka informationen som man tar hänsyn till i nätverket. Antag att efter att 10 bränder uppkommit i byggnaden har

8 startat i Område 1 och 2 i Område 2. Antag vidare att efter att 20 bränder uppkommit har 15 startat i Område 1 och 5 i Område 2.

Resultatet från uppdateringen av nätverket illustreras i Figur 5. I denna figur framgår det att de båda riskmåten stabiliseras desto mer information om bränder som man erhåller. Detta beror på att desto mer information om i vilket område som bränder uppstår ju säkrare blir man på vilket värde sannolikheten att en brand uppstår i Område 1 har.



Figur 5 Resultat från uppdateringen av riskmåten.

2.4. Slutsatser

Bayesianska nätverk och Influens diagram kan utgöra värdefulla verktyg när man är intresserad av brandrisken i en specifik byggnad. Framförallt är det väldigt enkelt att uppdatera en riskanalys som är utförd med hjälp av Bayesianska nätverk när man erhåller information om bränder i den aktuella byggnaden.

Eftersom det är möjligt att använda Influens diagram som utgångspunkt för ett antal riskmått kan man följa utvecklingen av dessa riskmått genom att man kontinuerligt uppdaterar Influens diagrammet med ny information om bränder som inträffar i den aktuella byggnaden. Detta gör det möjligt att på ett enkelt sätt illustrera utvecklingen av risken i en specifik byggnad.

3. Användning av expertutlåtanden i riskanalyser

Omfattningen av den empiriska information som finns tillgänglig angående många av de parametrar, exempelvis sannolikheter, som är nödvändiga att skatta i en riskanalys är ofta liten. Detta innebär att man i en analys kan tvingas använda andra källor för att komma fram till en skattning av till exempel en sannolikhet.

När man betraktar sannolikheter som subjektiva, vilket görs i den modell som producerats i det aktuella projektet, kan man använda en mängd olika informationskällor för att skatta en sannolikhet. Detta ger en ökad flexibilitet jämfört med om man använder den klassiska tolkningen av sannolikhet. Exempelvis kan man, om man använder den subjektiva tolkningen av sannolikhet använda expertutlåtanden för att modifiera en skattning av en sannolikhet, vilket är vad detta avsnitt handlar om. Användning av expertutlåtanden i samband med den typ av analys som beskrivits tidigare i projektet finns beskrivet på ett mer noggrant vis i uppsatsen ”On the Use of Bayesian Methods in Performance-Based Design and Decision Analysis Regarding Fire Safety” (Johansson, 2002b).

3.1. Beskrivning av osäkerhet rörande en skattning

Till att börja med är det viktigt att klargöra hur man representerar osäkerhet rörande en sannolikhet. I detta sammanhang kan detta göras genom att man låter en sannolikhetsfördelning representera osäkerheten rörande sannolikheten. Det är dock viktigt att vara medveten om att det finns andra sätt att representera osäkerhet rörande en parameter, exempelvis genom att använda intervall eller genom att använda olikheter såsom görs inom hypermjuk beslutsteori. Hypermjuk beslutsteori kommer att behandlas i nästa kapitel.

I detta kapitel kommer det att förutsättas att den modell för riskvärdering som är av intresse bygger på de resultat som presenterats tidigare i det aktuella projektet och att osäkra parametrar alltså representeras med hjälp av sannolikhetsfördelningar.

3.2. Metoder för att kombinera information från experter

I artikeln ”On the use of Bayesian methods in performance-based design and decision analysis regarding fire safety” (Johansson, 2002b) diskuteras fyra metoder för att använda experter i samband med skattning av sannolikheter. Dessa fyra metoder kan delas in i tre grupper beroende på hur informationen från experterna används.

Den första gruppen innebär att en samling experter kommer överens om en sannolikhetsfördelning som skall representera deras åsikt rörande en viss sannolikhet. Ett sätt att komma fram till en slutlig fördelning på detta sätt är att använda sig av Delphi-metod (se exempelvis Lindstone & Turoff, 1975). Delphi-metoden innebär att en analysledare kommunicerar med en grupp experter som inte får träffa varandra. Avsikten med att experterna inte skall träffas personligen är att exempelvis en dominerande individ inte skall kunna få för stort inflytande på den slutliga skattningen. Kommunikationen kan exempelvis ske genom att analysledaren skickar frågor till experterna och experterna ger sina individuella skattningar av den parameter som man är intresserad av. Analysledaren skickar därefter ut information till alla experter om vilka skattningar som gjorts och experterna får sedan möjlighet att ändra sin skattning. Denna process kan sedan upprepas ett antal gånger till dess att experternas skattningar stämmer någorlunda överens. I den tillämpning som diskuteras i denna rapport är man intresserad av en *fördelning* för en parameter, inte ett *specifikt* värde. Detta borde dock inte utgöra någon större svårighet att hantera med hjälp av Delphi-metodiken. I stället för att experterna ombeds skatta ett enda värde så skulle de i detta fallet skatta en fördelning, eller ett värde på en parameter som styr utseendet på en fördelning.

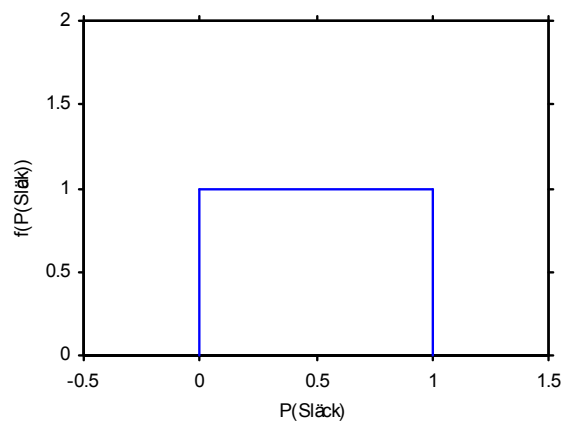
Processen kan sedan fortgå som en vanlig Delphi-process och till sist så kan experterna förhoppningsvis enas om en enda fördelning.

Den andra gruppen av metoder innebär att var och en av de experter som används representerar sin bedömning rörande den aktuella sannolikheten i form av en sannolikhetsfördelning. Dessa sannolikhetsfördelningar kombineras sedan på olika vis. I Johansson (2002b) redovisas två sätt att göra denna kombination. Det första sättet innebär att beslutsfattaren ger var och en av experterna ett vikt-värde, vilket innebär att ett högre värde innebär att beslutsfattaren tror att experten i fråga är bättre än en expert med lägre värde. Summan av de olika experternas vikter måste vara 1. Ett problem med detta sätt är hur man kommer fram till de olika vikterna som experterna skall få. För att göra detta finns olika metoder som man kan använda. Exempelvis kan man (1) använda lika vikter om det finns anledning att tro att de olika experterna ger lika bra skattningar, (2) använda vikter enligt en ranking av experterna, (3) använda vikter enligt en själv-ranking av experterna, eller (4) använda vikter som är baserade på tidigare bedömningar. Att använda lika vikter för experterna är naturligtvis det enklaste sättet och innebär att de olika experternas bedömningar får lika vikt för slutresultatet. Att ranka experterna och sedan ange viktningen efter rankingen kan exempelvis innebära att beslutsfattaren tilldelar k experter ett värde mellan 1 och k , där den bäste experten tilldelas värdet k , den näst bäste $k-1$, o.s.v. Därefter måste man normalisera rankingvärdena så att summan av dessa blir 1 och dessa normerade värden blir sedan de vikter som används. Alternativ (3), d.v.s. att låta experterna ranka sig själva bygger på att en expert kan vara kunnig inom ett område, exempelvis brandskydd, men det finns delområden där han/hon har olika nivå av kunskap inom och därför låter man experterna ranka sig själva med avseende på det aktuella området. Denna ranking, kan exempelvis genomföras genom att låta experterna ange ett värde mellan 1 och 5 och sedan normalisera dessa så att summan av de slutliga vikterna är 1. Att låta vikterna vara beroende av tidigare prestationer är möjligt (se exempelvis, Winkler 1967), men i det aktuella sammanhanget är det troligtvis inte praktiskt möjligt att genomföra undersökningar av hur bra skattningar en viss expert givit vid tidigare tillfällen.

Ett problem med att använda vikter för att kombinera olika sannolikhetsfördelningar från experter är att den resulterande fördelningen kan ha två ”toppar”, vilket kan vara problematiskt från praktiskt synvinkel. Ett sätt att undvika detta problem är att använda så kallade konjugerade fördelningar, vilket innebär att man specificerar från vilken typ av fördelning som en expert får välja sin sannolikhetsfördelning och sedan kan de fördelningar som experterna valt kombineras på ett enkelt sätt utan att ge upphov till fördelningar med två toppar. Användning av konjugerade fördelningar är den metod som är lättast att använda vid praktiska tillämpningar. Detta beror på att det är väldigt enkelt att uppdatera konjugerade fördelningar (se Johansson, 2002b).

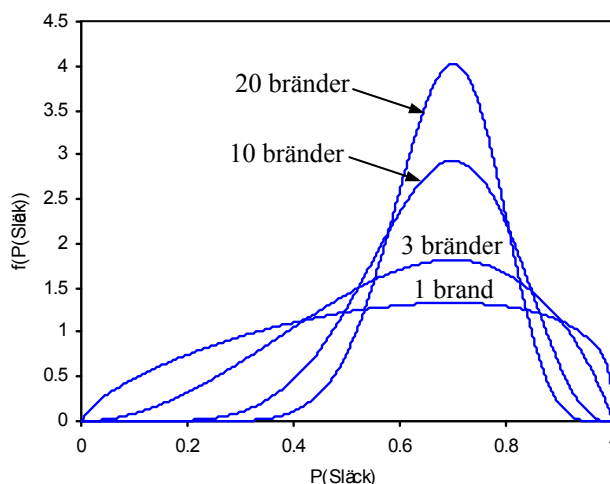
Den tredje gruppen av metoder innebär att experterna som tillfrågas om den aktuella sannolikheten anger en punktskattning, d.v.s. ett enda värde. De värden som erhålls från experterna används sedan som nytt ”bevis” för att uppdatera den apriori-fördelning som beslutsfattaren utgår ifrån. Detta fungerar genom att man betraktar experternas punktskattningar som likvärdigt med att experterna i fråga observerat ett visst antal händelser relaterade till den sannolikhet som är av intresse. Om man exempelvis är intresserad av sannolikheten för övertändning i ett specifikt rum med en viss bränslekonfiguration kan en expertskattning *tolkas* som att experten i fråga *observerat* ett visst antal bränder i liknande rum och att ett visst antal av dessa resulterat i en övertändning. Förhållandet mellan antalet (fiktiva) bränder och antalet övertändningar bestäms av vilken skattning av sannolikheten i

fråga som experten givit. Exempelvis kan experten ha angett 0,8 som sannolikheten för övertändning i rummet (givet brand) och i så fall skall antalet fiktiva övertändningar vara 80% av antalet fiktiva bränder. Hur många fiktiva bränder som man anser att experten har observerat bestämmer hur stor effekt expertens skattning skall ha för den slutliga fördelningen. Antag att en beslutsfattare är intresserad av en skattning av sannolikheten att räddningstjänsten kan släcka en brand i en viss typ av lokal (brandscenariot måste troligtvis specificeras mer för att en expert skall kunna ge en skattning) och att han/hon beslutat att konsultera en expert rörande denna skattning. Expertens anser att denna sannolikhet är 0,7 för den aktuella lokalen och det aktuella brandscenariot. Beslutsfattaren kan nu använda denna information för att uppdatera den ursprungliga skattningen av den aktuella sannolikheten. Antag att den ursprungliga (apriori) fördelningen är likformig, se Figur 6. En Beta-fördelning med parametrarna $a = 1$ och $b = 1$, se Johansson (2002b), är en likformig fördelning mellan 0 och 1 och kan alltså i detta fallet användas för att representera den information som finns om den aktuella sannolikheten innan experten tillfrågats. Den likformiga fördelningen innebär att alla värden mellan 0 och 1 är lika troliga.



Figur 6 Likformig apriori-fördelning som representerar sannolikheten att räddningstjänsten släcker en brand i en viss byggnad ($P(\text{Släck})$).

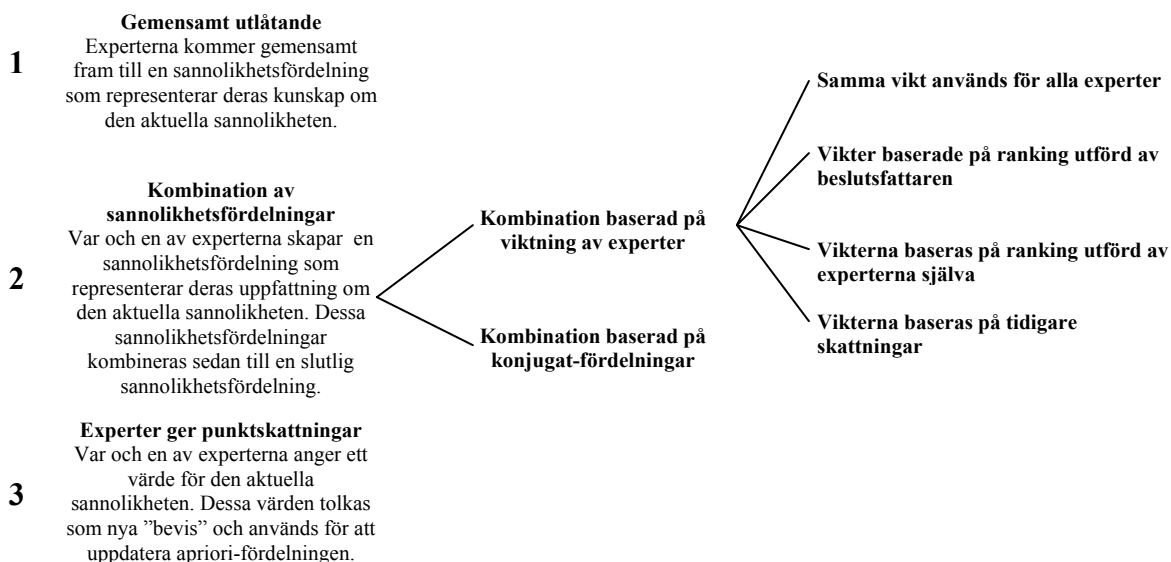
Expertens trodde att den aktuella sannolikheten var 0,7 och denna information betraktas som ett bevis med vilket den ursprungliga fördelningen skall uppdateras. Hur uppdateringen går till beskrivs i Johansson (2002b). Det intressanta i detta fallet är hur man betraktar det nya beviset. Enligt den modell som beskrivits ovan skall man betrakta expertens utlåtande om att sannolikheten att brandförsvaret släcker en brand i den aktuella byggnaden är 0,7 som att experten faktiskt observerat ett antal bränder i byggnaden. Antalet fiktiva bränder i byggnaden som släckts av räddningstjänsten skall i detta fallet vara 70% av det totala antalet fiktiva bränder. Antalet fiktiva bränder bestämmer hur stor inverkan expertens bedömning skall ha på den ursprungliga fördelningen och i detta illustreras i Figur 7 där olika posteriori-fördelningar, beroende på antalet bränder, illustreras.



Figur 7 Illustration av möjliga posteriori-fördelningar beroende på hur många fiktiva bränder som experten antas ha observerat.

I figuren framgår att ju mer fiktiva bränder som expertens information anses vara likvärdig med desto smalare blir den slutliga fördelningen. Detta är ett tecken på att osäkerheten rörande den aktuella sannolikheten minskar. Notera att alla fördelningar i Figur 7 är mer eller mindre koncentrerade runt värdet 0,7. Detta beror att 0,7 var den skattning som experten gav och det är därför naturligt med en koncentration runt detta värdet.

En sammanfattning av några av de metoder som kan användas för att ta hänsyn till expertskattningar finns i Figur 8.



Figur 8 Illustration av de tre grupperna, inklusive undergrupper, av metoder för att hantera expertbedömningar.

3.3. Slutsatser

Det är möjligt att använda expertutlåtanden på ett formellt sätt i riskanalyser. Oavsett vilken metod, av de som redovisats ovan, som man väljer att använda är det bra att dokumentera

åtminstone två saker då man använder sig av experter. För det första bör man dokumentera vad det är som gör experten lämplig att uttala sig i den specifika frågan. Detta har att göra med trovärdigheten, eller bevisvärdet, i expertens uttalande och i vissa av de metoder som redovisats ovan styr detta hur stor inverkan expertens utlåtande har på den slutliga skattningen. För det andra bör man dokumentera expertens motivering till den skattning som han/hon ger. Detta ger större möjligheter att bedöma informationsvärdet i expertens utlåtande.

Den information som dokumenteras om experten och dennes skattning används för att göra den slutliga bedömningen av informationsvärdet i expertens uttalande. Denna bedömning sker av beslutsfattaren och är i de flesta av de modeller som diskuterats ovan subjektiv. Endast i den modell som baseras på tidigare erfarenhet av experten och i den modell som baseras på självviktning sker bedömningen "objektiv". De bedömningsproblem som beslutsfattaren ställs inför med denna typ av modell rör experten i fråga, inte den aktuella sannolikheten. Detta är en fördel jämfört med att beslutsfattaren själv måste skatta en sannolikhet baserad på de skattningar som experterna ger.

Vilken metod som används för att kombinera expertskattningar beror på problemet som man analyserar samt de resurser som man har till sitt förfogande. De absolut enklaste metoderna finns i grupp 1 i Figur 8 där experterna gemensamt skapar en fördelning som representerar deras skattning. Den metod som verkar bäst att använda i samband med den analysmetod som använts för analys av investeringar i brandskydd i detta projekt är metoder från grupp 3 i Figur 8. Anledningen är att när dessa metoder används behöver experten endast ange ett värde för sannolikheten i fråga. Detta är förmodligen en fördel eftersom det kan vara svårt för experter att använda sannolikhetsfördelningar för att beskriva osäkerheten rörande en skattning.

I projektet "Index-metod för värdering av brandrisker i industrier" som finansieras av BRANDFORSK (Projektnummer: 108-021) kommer de metoder som tagits fram i det aktuella projektet att förenklas så att de kan användas i ett datorprogram. I detta datorprogram är det en fördel om man kan ange expertskattningar med hjälp av ett enda värde och inte behöver ange dem som fördelningar, och därför lämpar sig modeller ur grupp 3 i Figur 8 också bra för detta ändamål.

4. Hypermjuk beslutsteori

Beslut som har att göra med investeringar i brandskydd karakteriseras ofta av bristfällig information rörande parametrar som är av intresse för beslutet. I den modell för att analysera investeringar i brandskydd som använts i detta projekt har osäkra parametrar betraktats som statistiska fördelningar där fördelningarnas spridning representerar hur osäker beslutsfattaren är angående värdet på parametern. Ibland kan det dock finnas så lite information att det inte går att representera osäkerheten rörande en parameter med en statistisk fördelning, eller så kanske det inte finns tillräckligt med resurser för att genomföra en skattning av alla parametrar i form av statistiska fördelningar. I dessa fall kan det vara bra att använda en metod som inte kräver att man uttrycker sin kunskap i form av exakta värden, eller exakta sannolikhetsfördelningar. Hypermjuk beslutsteori (HB) är en sådan metodik och detta kapitel kommer att innehålla en kort presentation av metodiken samt ett tillämpningsexempel inom brandskyddsområdet där HB använts för att analysera en investering i brandskydd. Metodiken och exemplet har presenterats mer noggrant i artikeln ”Supersoft Decision Theory in Fire Risk Management” (Johansson & Malmnäs, 2002).

I BRANDFORSK-projektet ”Hypermjuk beslutsteori och ekonomisk optimering av det industriella brandskyddet” har ett datoriserat beräkningsverktyg som kan hantera analyser av beslut om investeringar i brandskydd med hjälp av HB producerats. Avsikten med den del som behandlar HB i detta projekt är att prova programmet på ett verkligt beslutsexempel, samt att jämföra metodiken med den metod som använts tidigare inom det aktuella projektet.

4.1. Kort introduktion

I stället för att använda exakta värden för sannolikheter och konsekvenser kan man med hjälp av HB använda uttalanden av typen ”Sannolikheten att sprinklersystemet släcker branden är mellan 0,4 och 0,9” för att undersöka om ett beslut angående en investering bör genomföras eller ej. Denna typ av uttalanden översätts i HB till olikheter, exempelvis $0,4 < P(\text{Släck}) < 0,9$, vilka sedan används för att analysera beslutet. För att göra analysen kan samma modell för brandspridning som används tidigare i projektet användas, d.v.s. händelseträds metodik kan användas för att beskriva möjliga brandscenarier i en byggnad.

Skillnaden mellan HB och den metod som används tidigare i projektet, vilken i fortsättningen kommer att benämnas ”Bayesiansk metodik”, är att i HB används sannolikheter och konsekvenser uttryckta i form av olikheter, medan i den Bayesianska metodiken används sannolikheter och konsekvenser uttryckta i form av sannolikhetsfördelningar. I båda fallen är det dock viktigt att kunna beräkna den förväntade nyttan med ett alternativ. I den Bayesianska metodiken är detta inte något problem, utan den förväntade nyttan kan beräknas som ett enda värde, men eftersom sannolikheter och konsekvenser är uttryckta som olikheter när man använder HB kan inte den förväntade nyttan beräknas som ett enda värde. I den Bayesianska metodiken används den förväntade nyttan för att avgöra vilket alternativ som är bäst (det alternativ med den högsta förväntade nyttan är bäst), men i HB används tre kriterier för att jämföra alternativ. Dessa kriterier är: den minsta möjliga förväntade nyttan med ett alternativ ($Min(E(U))$), den maximala förväntade nyttan med ett alternativ ($Max(E(U))$), samt medelvärdet av den förväntade nyttan ($Medel(E(U))$). Skillnaden mellan det Bayesianska sättet att genomföra en beslutsanalys och HB kommer att framgå bättre i nästa avsnitt då båda metoderna används för att analysera samma problem.

4.2. Jämförelse mellan Hypermjuk beslutsteori och Bayesiansk beslutsteori.

För att kunna jämföra de två metoderna har dessa applicerats på ett exempel som analyserats i en tidigare fas av projektet. Exemplet rör en investering i ett sprinklersystem i en byggnad som tillhörde ABB. I den analys som genomfördes i ABB-byggnaden analyserades en investering i ett heltäckande sprinklersystem. Genom att skapa en modell där sannolikheten för olika typer av brandscenarier kunde skattas samt att bedöma konsekvenserna om dessa brandscenarier skulle uppstå kunde den förväntade nyttan beräknas. Den förväntade nyttan beräknades både för alternativet att installera sprinklersystem i byggnaden och för att inte göra någonting alls. Dessa två förväntade nyttor kunde sedan jämföras och det alternativ med den högsta förväntade nyttan var det bästa alternativet. Eftersom detta exempel är mycket omfattande beslutades att enbart fokusera beräkningarna med HB på en av brandcellerna i byggnaden.

Händelseträdet som representerar olika brandscenarier i denna brandcell illustreras i Figur 9. Sannolikheterna för de olika händelserna i händelseträdet skattades i den ursprungliga analysen (Bayesiansk metodik) som triangelfördelningar. För att kunna jämföra resultaten mellan den ursprungliga analysen och en analys utförd med HB antogs att de gränser för intervallen som används för att göra analysen med HB är samma som de max- och min-gränser som användes i den ursprungliga analysen. De värden som beskriver de olika triangelfördelningarna (max, min, och mest troligt värde) finns i Tabell 16 och Tabell 17.

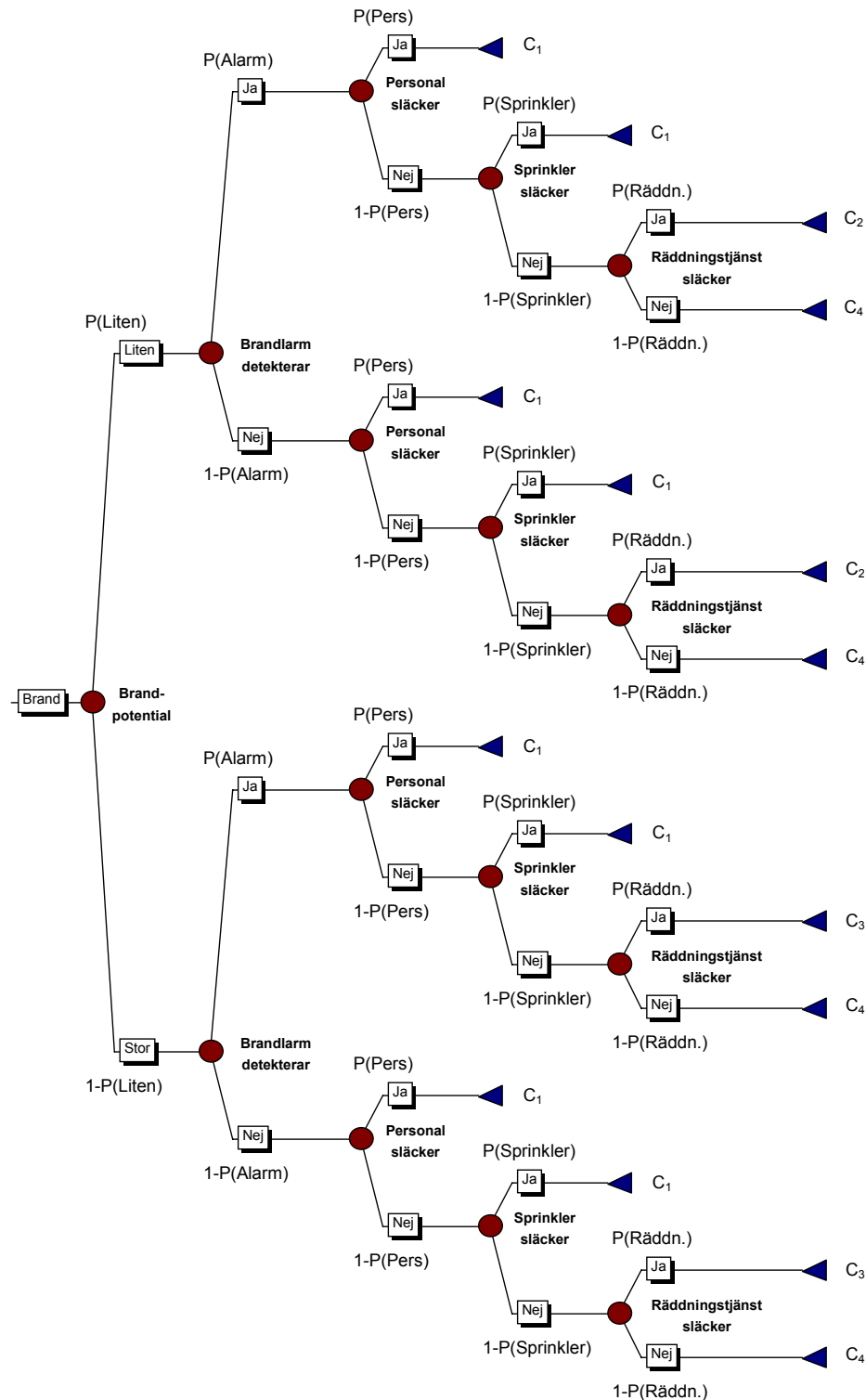
Tabell 16 De minsta, största och mest troliga värdena för de olika sannolikheterna i modellen för hur en brand kan utvecklas i den aktuella brandcellen. Alla sannolikheter rör händelser som förutsätter att brand har inträffat.

Sannolikhet	Förkortning	Min	Troligast	Max
Sannolikheten att brandens tillväxtpotential är liten, givet att brand uppkommit i lokalen.	P(Liten)	0,55	0,80	0,85
Sannolikheten att brandlarmet detekterar branden.	P(Alarm)	0,90	0,98	0,99
Sannolikheten att personalen lyckas släcka branden, givet att brandlarmet utlöst larmet.	P(Pers. Alarm)	0,70	0,80	0,95
Sannolikheten att personalen lyckas släcka branden, givet att brandlarmet inte utlöst larmet.	P(Pers. EjAlarm)	0,20	0,50	0,60
Sannolikheten att räddningstjänsten lyckas släcka branden innan den förstör brandcellen, givet att brandlarmet utlöst larmet.	P(Räddn. Alarm)	0,50	0,70	0,85
Sannolikheten att räddningstjänsten lyckas släcka branden innan den förstör brandcellen, givet att brandlarmet inte utlöst larmet.	P(Räddn. EjAlarm)	0,20	0,30	0,50
Sannolikheten att sprinklersystemet släcker branden.	P(Sprinkler)	0,90	0,95	0,98

Tabell 17 *Det minsta, största respektive det troligaste monetära värdet som motsvarar konsekvensen av de olika brandscenerierna.*

Brandscenario	Förkortning	Konsekvens uttryckt i monetära termer (kk)		
		Min	Troligast	Max
En brand släcks av personalen eller av sprinklersystemet.	C ₁	50	100	150
En brand med liten tillväxtpotential släcks av brandförsvaret.	C ₂	250	500	750
En brand med stor tillväxtpotential släcks av brandförsvaret.	C ₃	5330	10670	19330
Brandcellen förstörs av branden.	C ₄	259200	320000	387200

Eftersom det är den förväntade nyttan som skall jämföras mellan olika alternativ måste de monetära värdena räknas om till nyttovärden. I detta exempel har det antagits att beslutsfattaren är riskneutral, d.v.s. de nyttovärden som representerar de olika konsekvenserna beräknas från de monetära konsekvenserna med hjälp av ett linjärt samband. I detta exempel representerar nyttovärdet 0 den bästa konsekvensen, d.v.s. att ingen investering i sprinkler genomförs och att ingen brand uppstår. Den sämsta konsekvensen är att en investering i sprinkler genomförs, men att brandcellen ändå totalförstörs i en brand. Denna konsekvens tilldelas nyttovärdet -1.



Figur 9 Händelsetråd som visar möjliga brandscenarier i ABB-byggnaden.

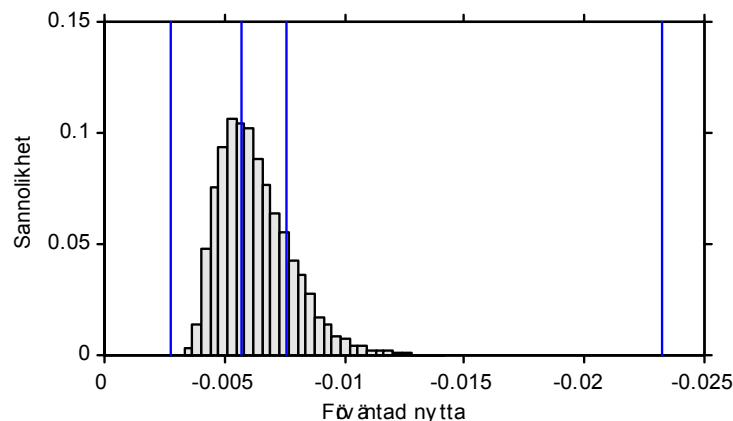
Eftersom de olika sannolikheterna och konsekvenserna i händelsetrådet inte är exakta värden, utan fördelningar, kan även den förväntade nyttan för de båda alternativen beskrivas med en fördelning. Genom att använda Monte Carlo-simulering kan en approximation av denna fördelning erhållas.

I den Bayesianska metoden som använts tidigare i projektet skall medelvärdet av fördelningen som beskriver den förväntade nyttan användas för att jämföra olika alternativ och det är intressant att jämföra denna beslutsregel med de kriterier som används inom HB. Det är dock viktigt att påpeka att HB inte enbart använder kvantitativa utvärderingar av alternativ, utan även kvalitativa. I denna tillämpning antas det dock att ett beslutsalternativ betraktas som det bästa endast om det har det högsta värdet för samtliga tre utvärderingskriterier (*Min*, *Max* och *Medel*).

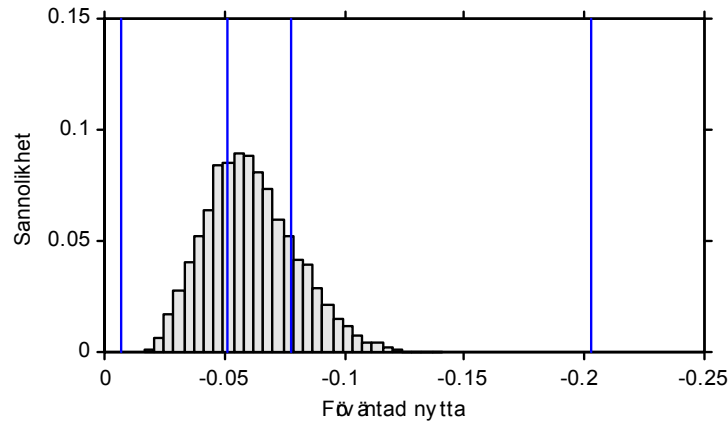
Resultatet från Monte Carlo-simuleringen för alternativet att installera sprinkler i brandcellen illustreras i Figur 10 och Figur 11, där även resultaten från utvärderingarna med HB presenteras.

Utvärderingen med hjälp av HB har genomförts med hjälp av ett nyligen utvecklat datorprogram (projektnummer: 104-991) i vilket man kan skapa händelsesträd och ange sannolikheter och konsekvensen med hjälp av intervall. Programmet kan sedan göra beräkningar av den minsta förväntade nyttan ($Min(E(U))$) och största förväntade nyttan ($Max(E(U))$). Programmet kan, i nuvarande utformning, inte beräkna medelvärdet av den förväntade nyttan $Medel(E(U))$. Däremot kan programmet beräkna $Min_u Medel_p(E(U))$ och $Max_u Medel_p(E(U))$, vilket innebär att programmet först beräknar medelvärdet med avseende på sannolikheterna och sedan minimum respektive maximum med avseende på nyttovärdena. $Min_u Medel_p(E(U))$ och $Max_u Medel_p(E(U))$ definierar ett intervall i vilket $Medel(E(U))$ är placerat och om man jämför två alternativ med hjälp av intervallen och finner att dessa inte överlappar varandra vet man vilket alternativ som har det högsta $Medel(E(U))$. Alternativet med det högsta $Medel(E(U))$ är det alternativ vars intervall täcker de högsta nyttovärdena.

I Figur 10 och Figur 11 presenteras resultaten från analyserna. I figurerna presenteras värdet för $Min(E(U))$ och $Max(E(U))$ med hjälp av de två streckade linjer som ligger längst till höger respektive längst till vänster i figurerna. Värdet för $Min_u Medel_p(E(U))$ och $Max_u Medel_p(E(U))$ ligger vid de mittersta linjerna. Resultaten från analysen med hjälp av HB presenteras även i Tabell 18.



Figur 10 Histogram som visar den förväntade nyttan för alternativet att installera sprinkler i brandcellen.



Figur 11 Histogram som visar den förväntade nyttan för alternativet att inte installera sprinkler i brandcellen.

Tabell 18 Resultaten från analysen av de båda beslutsalternativen med hjälp av HB.

Alternativ	Min	Min _u Medel _p	Max _u Medel _p	Max
Sprinkler	-0.0232	-0.0076	-0.0057	-0.0028
Ej sprinkler	-0.2023	-0.0773	-0.0509	-0.0065

Medelvärde för den fördelning för förväntad nytta som beräknas med Monte Carlo-simulering är ungefär $-0,061$ för alternativet att inte investera i ett sprinklersystem och $-0,006$ för alternativet att genomföra investeringen. Alltså skulle beslutsfattaren enligt den metoden investera i ett sprinklersystem eftersom den förväntade nyttan för det alternativet är större än för alternativet att inte genomföra investeringen. När det gäller utvärderingen med hjälp av HB framgår det av Tabell 18 att både $Min(E(U))$ och $Max(E(U))$ är större för alternativet att investera i sprinkler, vidare framgår också att de intervall som definieras av $Min_u Medel_p(E(U))$ och $Max_u Medel_p(E(U))$ inte överlappar och att intervallet för alternativet att investera i ett sprinklersystem täcker högre värden än intervallet för alternativet att inte investera. Alltså borde också en investering i ett sprinklersystem genomföras om $Min(E(U))$, $Max(E(U))$ samt $Medel(E(U))$ används som kriterium för att välja mellan alternativ.

4.3. Slutsatser

Exemplet som redovisats ovan visar på hur HB kan användas på ett problem rörande en investering i brandskydd. Det program som finns framtaget för att göra HB beräkningarna fungerar bra för denna typ av applikationer. En användare av programmet bör känna till användning av händelsetråd, samt känna till det sätt på vilket sannolikheter och konsekvenser hanteras på i HB.

Vid jämförelse mellan HB och den metod som använts tidigare i projektet framstår metoderna mera som komplement till varandra än som konkurrerande metoder. HB har den fördelen att man inte behöver speciellt mycket information för att kunna analysera ett problem och därför är det möjligt att analysera ett problem tidigt i en beslutsprocess, exempelvis för att kunna sälla bland en mängd alternativ. HB har också fördelen att metoden inte är lika arbetsintensiv som den metod som använts tidigare. Den Bayesianska metoden som använts tidigare har dock något mer lättolkade resultat, vilket innebär att de förmodligen är lättare att förstå för en person utan specialkunskaper i beslutsanalys. Exempelvis är de investeringskalkyler för

brandskydd som presenterats tidigare enkla att förstå eftersom terminologin som används liknar den som används vid traditionell investeringskalkylering.

En tänkbar användning av de två metoderna skulle kunna vara enligt följande: I inledningsskedet av en beslutsprocess då en beslutfattare vill ha en grov känsla för vilka alternativ som kan vara värda att analysera ytterligare skulle HB kunna användas för att göra en snabb analys av alternativen. Denna inledande analys kan sedan användas för att identifiera de beslutsalternativ som man bör fortsätta att analysera med den Bayesianska metodiken. Genom detta förfarande behöver man inte utföra den tidsödande Bayesianska analysen för alla alternativ, bara för de som visat sig lovande i en analys med HB.

5. Referenser

Haimes, Y. Y., *Risk Modeling, Assessment, and Management*, John Wiley & Sons, New York, 1998.

Johansson, H., *On the Use of Bayesian Networks in Fire Risk Management*, 2002a. *Ej publicerad**.

Johansson, H., *On the Use of Bayesian Methods in Performance-Based Design and Decision Analysis Regarding Fire Safety*, 2002b. *Ej publicerad**.

Johansson, H., Malmnäs, P.-E., *Supersoft Decision Theory in Fire Risk Management*, 2002. *Ej publicerad**.

Johansson, H., Investment Appraisal Using Quantitative Risk Analysis, *Journal of Hazardous Material*, 2002c. *Accepterad för publikation*.

Kaplan, S., The Words of Risk Analysis, *Risk Analysis*, Vol. 17, No. 4, 1997.

Lindstone, H.A., Turoff, M., *The Delphi Method, Techniques and Applications*. Addison-Wesley Publishing Company, London, 1975.

Winkler, R. L., The Quantification of Judgement: Some Methodological Suggestions, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 62, 1967, pp. 1105-1120.

* De tre artiklar som har skickats till internationella tidskrifter har vid tryckning av denna rapport ej blivit godkända för publicering.

Bilaga 1: Litteratur som producerats i projektet, eller som ett resultat av projektet

Rapporter (finns i elektronisk version på <http://www.brand.lth.se/>):

Johansson, H., *Brandfrekvenser och typbränder i industrianläggningar*, Brandteknik, Lunds universitet, Lund 1998.

Johansson, H., *Ekonomisk riskanalys av ABB Automation Products verksamhet i byggnad 358*, Brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1999.

Johansson, H., *Ekonomisk riskanalys av Avesta Sheffield's kallvalsverk i Nyby*, Brandteknik, Lund Universitet, Lund 1999.

Johansson, M., Rigberth, J., *Ekonomisk riskanalys av Iggesunds bruk*, Brandteknik, Lunds Universitet, Lund 1999.

Johansson, H., *Osäkerhetshantering i riskanalyser avseende brandskydd*, Lunds universitet, Brandteknik, Lund 2000.

Johansson, H., *Beslutsanalys och investeringskalkyler avseende brandskydd*, Lunds universitet, Brandteknik, Lund 2000.

Licentiatavhandling

Johansson, H., *Decision Making in Fire Risk Management*, Lunds universitet, Brandteknik, Lund 2001.

Uppsatser

Johansson, H., *Investment Appraisal Using Quantitative Risk Analysis*, *Proc. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 10th Int. Symposium, Stockholm 2001.

Johansson, H., *Decision Analysis Concerned With Investments in Fire Safety*, *Proceedings of the 7th International Symposium on Fire Safety Science*, Worcester, USA, 2002.

Johansson, H., *Investment Appraisal Using Quantitative Risk Analysis*, *Journal of Hazardous Material*, 2002. *Accepterad för publication*.

Johansson, H., *On the Use of Bayesian Networks in Fire Risk Management*, 2002a. *Ej publicerad**.

Johansson, H., *On the Use of Bayesian Methods in Performance-Based Design and Decision Analysis Regarding Fire Safety*, 2002b. *Ej publicerad**.

Johansson, H., Malmnäs, P.-E., *Supersoft Decision Theory in Fire Risk Management*, 2002. *Ej publicerad**.

* De tre artiklar som har skickats till internationella tidskrifter har vid tryckning av denna rapport ej blivit godkända för publicering.