Metoder för risk- och sårbarhetsanalys

- med inriktning mot allvarliga händelser inom processindustri och transport av farligt gods

Johan Ingvarson
Annika Roos

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Avdelningen för Brandteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet

Report 5113, Lund 2003

Metoder för risk- och sårbarhetsanalys

- med inriktning mot allvarliga händelser inom processindustri och transport av farligt gods

Johan Ingvarson
Annika Roos

Lund 2003

Titel: *Metoder för risk- och sårbarhetsanalys - med inriktning mot allvarliga händelser inom processindustri och transport av farligt gods*

Title: *Methods for Risk and Vulnerability Analysis - regarding serious events in the area of process industri and transport of dangerous goods*

Av/By
Johan Ingvarson
Annika Roos

Civilingenjörsprogrammet i Riskhantering och Brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola, 2003.

Författarna svarar för innehållet i rapporten

Report 5113
Number of pages: 103
Illustrations: Johan Ingvarson & Annika Roos

Nyckelord: Risk- och sårbarhetsanalys, Felträdsanalys, Händelseträdsanalys, Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden), Quantitative Risk Analysis, Anticipatory Failure Determination, Hierarchical Holographic Modelling, System Action Management.

Key words: Risk and Vulnerability Analysis; Fault Tree Analysis; Event Tree Analysis; Method for risk analysis of the transportation of hazardous materials by road and rail; Quantitative Risk Analysis, Anticipatory Failure Determination; Hierarchical Holographic Modelling; System Action Management.

Language: Swedish

© Copyright: Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Lund 2003.

Avdelningen för Brandteknik
Lunds Universitet
Box 118
221 00 Lund

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

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

Abstract:
In this report, methods for risk and vulnerability analysis of technological infrastructure and transport are examined. Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis, and QRA can, along with Anticipatory Failure Determination, Hierarchical Holographic Modelling, and System Action Management, be used as methods for risk and vulnerability analysis of technical infrastructure. For risk and vulnerability analysis of transports, new methods have to be invented. It is a serious problem that there are no satisfactory metods for risk analysis of transport of hazardous materials. The methods that must be invented could for example be based on quantitative approaches such as the concept of Hot spots.

Förord

Vi vill tacka de personer som har varit till stor hjälp under vårt examensarbete. Framförallt vill vi rikta ett varmt tack till vår handledare professor Sven Erik Magnusson för engagerad och kunnig vägledning. Vi vill också tacka den övriga personalen vid avdelningen för Brandteknik som under arbetets gång alltid ställt upp och försökt svara på våra frågor och hjälp oss med litteratur och idéer.

Lund i december 2002

Johan Ingvarson & Annika Roos

Den här rapporten har blivit accepterad för presentation på:

First World Congress on Risk i Bryssel den 25 juni 2003
i sessionen
Sustainable Development With Acceptable Risks

Sammanfattning

Det ställs allt hårdare krav att öka beredskapen för svåra påfrestningar och som ett led i detta finns det numera uttryckliga lagkrav på genomförandet av risk- och sårbarhetsanalys. Det finns idag inga tydliga instruktioner för hur dessa ska genomföras. Syftet med föreliggande rapport är att undersöka vilka metoder som skulle vara lämpliga att använda för de risk- och sårbarhetsanalyser som ska genomföras inom områdena teknisk infrastruktur och transport. Som utgångspunkt används traditionella metoder för riskanalys.

En inventering av befintliga metoder för riskanalys beträffande såväl mänskliga som tekniska och organisatoriska faktorer genomförs inledningsvis. De metoder som är kvantitativa till sin karaktär och ger ett absolut mått på risknivån hos det analyserade systemet samt är tillämpbara för risk- och sårbarhetsanalys väljs ut för vidare analys. De metoder som uppfyller kraven är Felträdsanalys, Händelseträdsanalys, Quantitative Risk Analysis och Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden). De fyra utvalda metoderna analyseras med avseende på hur variationer i indata påverkar resultatet och hur detta i sin tur påverkar metodernas användbarhet och lämplighet som metod för risk- och sårbarhetsanalys.

För Felträdsanalys visar analysen att de faktorer som avgör hur stor betydelse en viss parameter har för slutresultatet är storleken på trädet, var i trädet parametern befinner sig samt vilken typ av logisk grind som parametern är bunden till. Ju större träd och ju längre ner i trädets förgreningar desto mindre roll spelar variationer i den enskilda parametern för slutresultatet. Motsvarande analys av Händelseträdsanalys visar att den enda faktor som avgör hur stor betydelse en viss parameter har för slutresultatet är storleken på trädet; ju större träd desto mindre roll spelar variationer i den enskilda parametern för slutresultatet.

Problemet med Felträdsanalys och Händelseträdsanalys ligger inte i beräkningsmodellerna utan i svårigheterna med att identifiera alla möjliga händelser och dess sannolikheter/frekvenser. Det krävs tillgång till tillförlitliga data för felhändelsernas sannolikhet/frekvens alternativt metoder för hur man ska hantera osäkra eller obefintliga indata. Trots detta anses metoden vara lämplig för risk- och sårbarhetsanalys.

Analysen av VTI-metoden visar på att metoden kan ifrågasättas för risk- och sårbarhetsanalys mot bakgrund av att formler och index för beräkning av olycksfrekvensen, både för väg och järnväg, ej är tillräckligt väl underbyggda och dess sammansättning motiveras ej tillfredsställande. Dessutom behandlas flera parametrar med stor inverkan på resultatet alltför grovt och godtyckligt för att ge en tillfredsställande beskrivning av verkligheten. Vidare visar analysen att plankorsningar inte utgör en betydelsefull parameter vid riskberäkning. Detta går emot den gängse uppfattningen om risker med järnvägstrafik där plankorsningar ses som en av de viktigaste faktorerna för säkerheten kring järnväg. Därför anses beräkningsmetoden ej lämplig som metod för risk- och sårbarhetsanalys.

För QRA-metodiken visar analysen att parametrarna skadekriterier, spridningsvinkel och befolkningstäthet har så stor inverkan på resultatet att dåliga värden eller värden med alltför stora osäkerheter kan medföra att riskanalysen inte korrekt beskriver den verkliga risknivån. I och med att felträd och händelseträd används som en del av QRA medför det att problemen med att identifiera alla möjliga händelser och dess sannolikheter/frekvenser återfinns även här. QRA-metodiken är en riskanalysmetod som är användbar i många situationer och som trots sitt beroende av tillfredsställande indata är en bra och heltäckande metod för att

analysera ett systems risker. Då metodiken innebär en omfattande och djuplodande analys av både sannolikheten för och konsekvenserna av olika händelser anses att QRA är lämplig som metod för risk- och sårbarhetsanalys.

För att komma tillrätta med problemen med identifiering av samtliga händelser bör ovan nämnda metoder kompletteras med exempelvis Anticipatory Failure Determination (AFD) och/eller Hierarchical Holographic Modelling (HHM). AFD är en metod som tack vare ett annorlunda angreppssätt underlättar identifieringen av samtliga scenarier. HHM är en modell för strukturering av problemområden som underlättar en systematisk identifiering av möjliga scenarier.

Problemet med att tillskriva olika händelser ”rätt” sannolikheter/frekvenser, i synnerhet beträffande mänsklig tillförlitlighet och påverkan av organisatoriska faktorer, kan avhjälpas med hjälp av System Action Management (SAM). SAM är en analytisk arbetsgång som tagits fram för att försöka strukturera och kvantifiera mänskliga och organisatoriska faktorer. De sannolikheter/frekvenser som inte härrör från mänskliga eller organisatoriska faktorer är också ett stort problem och ett alternativ för att komma tillrätta med det är att, i likhet med holländarna, standardisera arbetsgången för kvantitativa riskanalyser. Med standardisering underlättas också värdering av risk. Exempelvis kan kriterier för värdering av risk fastställas för att avgöra vilka risknivåer som anses vara acceptabla.

Felträdsanalys, Händelseträdsanalys och QRA kan således, tillsammans med AFD, HHM och SAM, sägas utgöra grunden i en verktygslåda för genomförandet av risk- och sårbarhetsanalys inom teknisk infrastruktur. Framtida forskning bör inriktas mot att specialanpassa dessa metoder till risk- och sårbarhetsanalys. För motsvarande analyser inom transportområdet måste nya metoder utvecklas. Det är allvarligt att det inte finns bra metoder för riskanalys av transport av farligt gods. De metoder som måste tas fram kan till exempel baseras på kvantitativa tillvägagångssätt som Hot spots.

Summary

The standards are being raised on the preparedness of society to manage serious crises. One way of doing this is by legislating the performance of risk and vulnerability analysis. There are, however, no directions on how these analyses are to be performed. The purpose of this thesis is to examine what methods can be used for risk and vulnerability analysis of technological infrastructure and transport. As a starting-point, traditional methods for risk analysis have been used.

An inventory of existing methods for risk analysis regarding human reliability as well as technical and organisational aspects is performed to start with. The methods that are, in addition to being applicable to risk and vulnerability analysis, by nature quantitative and result in an absolute measure of risk, is chosen for further analysis. The methods complying with these criterions are Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis, Quantitative Risk Analysis and Method for risk analysis of the transportation of hazardous materials by road and rail. The four methods are further dealt with studying the relationship between what is put into the model and what comes out and how this will affect the methods practicability and applicability as method for risk and vulnerability analysis.

Regarding Fault Tree Analysis, the analysis points out the size of the tree, the parameter's position in the tree and the kind of logic gate connected to the parameter as the most important elements to the result. The larger the tree and the lower the parameter is positioned, the more important to the result the separate element is. The analogous analysis for Event Tree Analysis show that the only element that affects the impact the parameter has to the result is the size of the tree; the larger the tree, the less important variations in the separate parameter are.

The difficulties or problems in using Fault Tree Analysis and Event Tree Analysis lies not in the calculation models, but in identifying all possible events and their probabilities/frequencies. Reliable data for the scenario's probabilities/frequencies or methods for dealing with unreliable or not existing data is required. Despite these problems, the methods are considered applicable as methods for risk and vulnerability analysis.

The analysis of the Method for risk analysis of the transportation of hazardous materials by road and rail show that it is not applicable as method for risk and vulnerability analysis. The formulas and indices used in the model are not satisfactory justified. In addition to this, many parameters that have large impact on the model's result are treated too roughly and arbitrarily to give a correct description of the actual risk level. More, the analysis show that railway crossings are not an important contributor to the over-all risk. This does not correspond to the general meaning of crossings being one of the most important parts of the railway system's safety.

Regarding QRA, the analysis shows that damage criterion, plume arc, and population density have so large impact on the result that uncertain values could result in an incorrect description of the risk level. Since Fault Tree Analysis or Event Tree Analysis often are used as a part of the QRA, the difficulties in identifying all possible scenarios along with appropriate probabilities/frequencies, also appear with the QRA methodology. QRA is, however, a method that is applicable in many situations and despite its dependency on satisfactory data, the method gives a good and informative description of a system's risk level. Because of the

extensive and comprehensive analysis of both probability and consequences, QRA is considered applicable as method for risk and vulnerability analysis.

To handle the difficulties in identifying all possible events and scenarios, Anticipatory Failure Determination (AFD) and/or Hierarchical Holographic Modelling (HHM) should supplement the methods mentioned above. AFD is a method that, due to a different approach, facilitates the identification of all scenarios. HHM is a model for structuring problems that facilitates a systematic inventory of possible scenarios.

The issue of addressing proper probabilities/frequencies to different events, especially for human reliability and the influence of organisational factors, can be handled by System Action Management (SAM). SAM is analytical procedure for structuring and quantifying human and organisational factors. The probabilities/frequencies for other factors is also an issue of concern and one way to deal with the problem is to standardize the procedure of risk analysis. Standardisation also facilitates the assessment of risks. For example, criterion for the assessment of risk can be used to decide if a level of risk is acceptable or not.

Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis, and QRA can, along with AFD, HHM, and SAM, be used as methods for risk and vulnerability analysis of technical infrastructure. For risk and vulnerability analysis of transports, new methods have to be invented. It is a big problem that there are no satisfactory methods for the risk analysis of transport of hazardous materials. The methods that must be invented could for example be based on quantitative approaches such as the concept of Hot spots.

Innehållsförteckning

FÖRORD **7**

SAMMANFATTNING **9**

SUMMARY **11**

1 INLEDNING **15**

1.1 BAKGRUND 15
1.2 SYFTE 16
1.3 METOD 16
1.4 RAPPORTENS DISPOSITION 16
1.5 AVGRÄNSNINGAR 17

2 METODER FÖR RISK- OCH SÅRBARHETSANALYS **19**

2.1 VAD ÄR RISK- OCH SÅRBARHETSANALYS? 19
2.2 KORT BESKRIVNING AV VALDA RISKANALYSMETODER 19
2.2.1 AEA- Action Error Analysis (Operatörsanalys) *19*
2.2.2 Avvikelseanalys *19*
2.2.3 Checklistor *20*
2.2.4 Energianalys *20*
2.2.5 Felträdsanalys *20*
2.2.6 FMEA- Failure Mode and Effects Analysis *21*
2.2.7 Grovanalys *21*
2.2.8 HAZOP – Hazard and Operability Analysis *21*
2.2.9 HEAT- Human Error Analytical Taxonomy *22*
2.2.10 Händelseträdsanalys *22*
2.2.11 Indexmetoder *22*
2.2.12 MIMIX- Method for investigation management impact to causes and consequenses *23*
2.2.13 MORT - Management and Oversight Risk Tree *23*
2.2.14 QRA – Quantitative Risk Analysis *23*
2.2.15 RIA- Risk Influence Analysis *23*
2.2.16 Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden) *24*
2.2.17 SLIM- Success Likelihood Index Method *24*
2.2.18 SMORT- Safety Management and Organisation Review Technique *24*
2.2.19 THERP- Technique for Human Error Rate Prediction *25*
2.2.20 ”What-If”-analys *25*
2.3 INDELNING AV RISKANALYSMETODERNA 25
2.4 GENERELLT OM VAL AV RISKANALYSMETOD 26
2.5 VAL AV RISKANALYSMETODER FÖR VIDARE ANALYS INOM VALT OMRÅDE 27

3 OSÄKERHETER I RISKANALYSER **29**

3.1 OLIKA TYPER AV OSÄKERHETER 29
3.2 BESKRIVNING AV OSÄKERHETER 29
3.3 METODER FÖR HANTERING AV OSÄKERHETER 31
3.3.1 Känslighetsanalys *31*
3.3.2 Gaussapproximationer och Taylorutveckling *31*
3.3.3 Monte Carlo-analys *31*
3.4 OLIKA NIVÅER AV OSÄKERHETSHANTERING 34

4 FELTRÄDSANALYS **37**

4.1 METODBESKRIVNING 37
4.1.1 Bakgrund och syfte *37*
4.1.2 Arbetsgång *37*
4.1.3 Beräkning av förväntat värde på topphändelsen *39*
4.2 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA 40
4.2.1 Variation av indata och resultat *40*
4.2.2 Slutsats och diskussion kring felträdsmetodikens lämplighet *41*

5 HÄNDELSETRÄDSANALYS **42**

5.1 METODBESKRIVNING 42
5.1.1 Bakgrund och syfte 42
5.1.2 Arbetsgång 42
5.1.3 Beräkning av förväntat värde på sluthändelserna 43
5.2 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA 43
5.2.1 Variation av indata och resultat 43
5.2.2 Slutsats och diskussion kring händelseträdsmetodikens lämplighet 44

6 RISKANALYSMETOD FÖR TRANSPORTER AV FARLIGT GODS PÅ VÄG OCH JÄRNVÄG (VTI-METODEN) 45

6.1 METODBESKRIVNING 45
6.1.1 Bakgrund och syfte 45
6.1.2 Uppskattning av förväntat antal farligtgodsolyckor vid transport på väg med utsläpp 45
6.1.3 Uppskattning av förväntat antal farligtgodsolyckor vid transport på järnväg med utsläpp 47
6.1.4 Konsekvensuppskattning av farligtgodsolyckor vid transport på väg och järnväg 48
6.2 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA FÖR VÄG 49
6.2.1 Variation av indata 49
6.2.2 Resultat och diskussion 50
6.3 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA FÖR JÄRNVÄG 51
6.3.1 Variation av indata 51
6.3.2 Resultat och diskussion 52
6.4 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA FÖR KONSEKVENSUPPSKATTNING 55
6.5 SLUTSATS OCH DISKUSSION KRING VTI-METODENS LÄMPLIGHET 55

7 QRA - QUANTITATIVE RISK ANALYSIS 59

7.1 METODBESKRIVNING 59
7.1.1 Bakgrund och syfte 59
7.1.2 Arbetsgång 59
7.1.3 Beräkning av det förväntade värdet på individrisken 61
7.1.4 Beräkning av det förväntade värdet på samhällsrisken 62
7.2 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA FÖR INDIVIDRISK 63
7.2.1 Variation av indata 63
7.2.2 Resultat och diskussion 64
7.3 ANALYS AV FÖRHÅLLANDET MELLAN IN- OCH UTDATA FÖR SAMHÄLLSRISK 65
7.3.1 Variation av indata 65
7.3.2 Resultat och diskussion 66
7.4 SLUTSATS OCH DISKUSSION KRING QRA:S LÄMPLIGHET 68

8 ALTERNATIV OCH KOMPLEMENT TILL ANALYSERADE METODER 71

8.1 KVANTITATIVA RISKANALYSER I ANDRA LÄNDER 71
8.1.1 Kvantitativa riskanalyser i Holland 71
8.1.2 Kvantitativa riskanalyser i Storbritannien 72
8.2 RISKANALYSMETODER FÖR TRANSPORT AV FARLIGT GODS 72
8.3 ANTICIPATORY FAILURE DETERMINATION (AFD) 73
8.4 HIERARCHICAL HOLOGRAPHIC MODELLING (HHM) 76
8.5 SYSTEM ACTION MANAGEMENT (SAM) 77

9 SAMMANFATTANDE DISKUSSION 81

10 REFERENSER 83

10.1 TRYCKTA KÄLLOR 83
10.2 ELEKTRONISKA KÄLLOR 87
10.3 MUNTLIGA KÄLLOR 87

11 FÖRTECKNING ÖVER BILAGOR 89

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Dagens samhälle är komplext och känsligt för störningar. För att minska sannolikheten för och konsekvenserna av en olycka ställs allt fler krav på olika former av system och metoder för att öka den samhälleliga robustheten. Som ett första steg i detta arbete började det ställas krav på genomförandet av riskanalys i olika sammanhang. Exempel på lagstiftning där det ställs krav på riskanalyser för verksamheter som kan utgöra en risk för människors hälsa eller miljö är Miljöbalken och Lag om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor[1,2]. Enligt dessa lagar är innehavaren av en riskfylld verksamhet ansvarig för att en riskanalys görs. I takt med att antalet utförda riskanalyser ökar ställs det också hårdare krav på dess innehåll och kvalitet.

Den 1 juli 2002 inrättades Krisberedskapsmyndigheten (KBM) för att samordna arbetet med samhällets beredskap inför allvarliga kriser. Huvuddelen av KBM:s verksamhet handlar om förebyggande och förberedande insatser[3]. En del av KBM:s ansvarsområden är att inom sitt område sammanställa risk- och sårbarhetsanalyser och genomföra övergripande analyser av dessa[4]. Förordningen med instruktion för KBM samt Förordningen om åtgärder för fredstida krishantering och höjd beredskap ställer nya krav på myndigheter på lokal, regional och nationell nivå att genomföra och sammanställa risk- och sårbarhetsanalyser:

> Varje myndighet ska i syfte att stärka sin krisberedskapsförmåga årligen analysera om det finns sådan sårbarhet och sådana risker inom myndighetens ansvarsområde som synnerligen allvarligt kan försämra förmågan till verksamhet inom området…[5]

Risk- och sårbarhetsanalyser är en del av det krisförberedande arbetet som sker inom sex olika samverkansområden; teknisk infrastruktur, transport, spridning av farliga ämnen, ekonomisk säkerhet, områdesvis samordning och information samt skydd, undsättning och vård[6].

Det finns idag inga tydliga instruktioner för hur dessa risk- och sårbarhetsanalyser ska genomföras och därför används traditionella metoder för riskanalys som utgångspunkt i diskussionen kring vilka metoder som skulle kunna vara lämpliga att använda för risk- och sårbarhetsanalyser. Det finns idag en uppsjö av riskanalysmetoder och det finns svårigheter med att finna en lämplig metod för en viss specifik situation. Ofta används den metod som utföraren är väl bekant med och inte alltid den som är bäst lämpad för det specifika objektet. Detta kan leda till att resultatet av riskanalysen inte blir tillförlitligt och felaktiga beslut fattas. Orsaken till att denna situation kan uppkomma är dels att kompetensen hos såväl beställare, utförare som granskare av riskanalyser i många fall inte är tillräcklig, dels för att det inte finns tillräckligt bra riskanalysmetoder.

Det är inte bara val av riskanalysmetod som kan medföra svårigheter. Samma metod kan ge olika resultat beroende på utföraren vilket visar på problemen med att korrekt beskriva

[1] SFS 1998:808
[2] SFS 1999:381
[3] Krisberedskapsmyndighetens hemsida, 2002-11-18
[4] SFS 2002:518, §2:3
[5] SFS 2002:472, §3
[6] SFS 2002:472

risknivån inom ett system. I slutet av 2001 avslutades den så kallade ASSURANCE-studien (ASSessment of Uncertainties in Risk ANalysis of Chemical Establishments) där sju grupper från olika europeiska länder genomförde en kvantitativ riskanalys på en anläggning med ammoniak[7]. Elva olika scenarier var redan specificerade och gruppernas uppgift var att uppskatta konsekvenser och frekvenser för dessa. Resultatet från de olika analysgrupperna visar på mycket stora skillnader både när det gäller frekvenser och konsekvenser trots att systemet var klart definierat.

1.2 Syfte

Syftet med föreliggande rapport är att undersöka vilka metoder som skulle vara lämpliga att använda för de risk- och sårbarhetsanalyser inom områdena tekniska infrastruktur och transport som ska genomföras. I och med att det idag inte finns tydliga instruktioner för hur dessa ska genomföras omfattar syftet såväl traditionella metoder för riskanalys som nya infallsvinklar och angreppssätt. Vidare syftar också rapporten till att öka kunskapen om de osäkerheter som är förknippade med riskanalys och olika sätt att hantera dem.

1.3 Metod

Risk- och sårbarhetsanalys syftar till att identifiera, analysera och i möjligaste mån förebygga allvarliga händelser som kan medföra svåra påfrestningar i samhället. Ett stort antal metoder för analys av risker identifieras och en diskussion kring hur man väljer ”rätt” analysmetod förs. Därefter görs en analys av metodernas användbarhet och kvalitet för fyra av dessa. Dessa är Felträdsanalys, Händelseträdsanalys, VTI-metoden och QRA. De fyra utvalda metoderna analyseras med avseende på hur variationer i indata påverkar resultatet och hur detta i sin tur påverkar metodernas användbarhet och lämplighet som metod för risk- och sårbarhetsanalys för allvarliga händelser inom processindustri och farligt gods. De brister och nackdelar som pekas ut med hjälp av analysen diskuteras tillsammans med alternativa metoder. Vidare beaktas även nya angreppssätt som skulle kunna förbättra befintliga metoder. Som underlag till analysen av metodernas kvalitet används ett teoretiskt resonemang om hantering av osäkerheter.

Metoder som används i arbetet utgörs främst av omfattande litteraturstudier. I anslutning till den analys som genomförs används enkla beräkningsmodeller och till viss del även datorprogram. Alternativa tillvägagångssätt som inledningsvis valts bort är kvalitativa intervjuer med användare av riskanalysmetoder då detta anses vara ett alltför tidskrävande arbete och bedöms inte ge mer information än de metoder som används.

1.4 Rapportens disposition

Då det saknas en klar definition av vad risk- och sårbarhetsanalys innebär används i rapporten traditionell riskanalys som utgångspunkt. Inledningsvis görs en inventering av befintliga metoder för traditionell riskanalys. Av dessa väljs fyra metoder ut som är kvantitativa till sin karaktär, analysresultatet ger ett absolut mått på risknivån hos det analyserade systemet och metoderna är tillämpbara för risk- och sårbarhetsanalys inom områdena teknisk infrastruktur eller transport. Ett teoretiskt resonemang om osäkerheter och hantering av osäkerheter används som underlag för analys av dessa fyra metoder. De fyra metoderna analyseras sedan med avseende på förhållandet mellan in- och utdata och därmed metodernas lämplighet för risk- och sårbarhetsanalys för allvarliga händelser inom processindustri och farligt gods. För att åtgärda eller undvika de brister som lyfts fram i analysen ges förslag på alternativa

[7] Lauridsen, K., et al, 2001

metoder för risk- och sårbarhetsanalys. De alternativ som diskuteras innefattar såväl nya metoder som nya synsätt som kan införlivas i analysmetoder.

1.5 Avgränsningar

Arbetet med att identifiera lämpliga metoder för risk- och sårbarhetsanalys avgränsas till att omfatta säkerhet inom de två samverkansområdena teknisk infrastruktur och transport. Beträffande den tekniska infrastrukturen ligger fokus på riskanalysmetoder inom processindustri och gällande transporter undersöks främst riskanalysmetoder för transport av farligt gods. Den inventering av riskanalysmetoder som görs omfattar inte samtliga metoder utan de vanligast förekommande inom ovan angivna områden. En noggrann analys av lämpligheten för risk- och sårbarhetsanalys görs endast för fyra metoder. För de riskanalysmetoder som innehåller spridningsberäkningar diskuteras ej spridningsmodellernas giltighet och förhållande mellan in- och utdata.

2 Metoder för risk- och sårbarhetsanalys

2.1 Vad är risk- och sårbarhetsanalys?

Det finns idag ingen definition på begreppet risk- och sårbarhetsanalys då det är ett nytt begrepp vars innehåll inte tydligt definierats. Med anledning av detta används i denna rapport metoder för traditionell riskanalys som utgångspunkt. Det finns många olika definitioner på begreppet riskanalys. En definition anger riskanalys som en systematisk identifiering av riskkällorna i ett system inklusive kvantitativ eller kvalitativ värdering av risk[8]. En annan definition menar att en riskanalys innehåller definition av omfattning, identifikation av riskerna samt grov beräkning av risken[9]. I denna rapport avser riskanalys en systematisk identifiering av riskkällorna i ett system med eller utan beräkning och värdering av riskerna.

2.2 Kort beskrivning av valda riskanalysmetoder

Det finns en uppsjö av metoder för riskanalys. För att undersöka vilka riskanalysmetoder som kan vara lämpliga att analysera beträffande förhållandet mellan in- och utdata har en genomgång av ett stort antal metoder gjorts. Metoderna har valts i försök att täcka in både tekniska, mänskliga och organisatoriska aspekter. Vidare utgör de valda metoderna de vanligast förekommande riskanalysmetoderna. Urvalet har också gjorts med hänsyn till att få med metoder som är kvalitativa såväl som kvantitativa samt metoder i förebyggande avseende såväl som olycksutredande syfte. I denna rapport redovisas endast en del av de riskanalysmetoder som finns[10]. Dock utgör många riskanalysmetoder varianter av mer etablerade metoder.

Följande genomgång av riskanalysmetoder är en kort redogörelse från en omfattande genomgång av riskanalysmetoder som gjorts på uppdrag av Svenska Brandförsvarsföreningen[11].

2.2.1 AEA- Action Error Analysis (Operatörsanalys)

AEA bygger på en stegvis beskrivning av genomförandet av olika operationer. För varje steg identifieras tänkbara felhandlingar, beslutsfel, konsekvenser och orsaker. Varje steg i det analyserade operationsgenomförandet granskas med hjälp av ledord, exempelvis ingen handling, felaktig åtgärd, för tidig eller sen åtgärd m.fl. Efter genomförd analys kan åtgärdsförslag ges. AEA resulterar i en kvalitativ systematisk beskrivning av operatörens uppgifter som innefattar ett stort antal möjliga felhandlingar samt åtgärdsförslag.[12,13]

2.2.2 Avvikelseanalys

Avvikelseanalysen är en generell kvalitativ riskanalysmetod som syftar till att identifiera avvikelser i ett tekniskt system eller en aktivitet som kan leda till skador samt ge åtgärdsförslag. Genom att dela upp systemet i mindre delar och använda en checklista som anger tekniska, mänskliga och organisatoriska avvikelser blir analysen mer lättarbetad. Avvikelserna identifieras en och en och bedöms sedan som acceptabel eller inte. Om avvikelsen inte accepteras, ges förslag på åtgärder. En avvikelseanalys kan appliceras på såväl

[8] Kemikontoret, 2001 (s. 5)
[9] IEC, 1995 (s. 11)
[10] Tixier, J. et al, 2002
[11] Ingvarson, J., Roos, A., 2002
[12] Kemikontoret, 2001
[13] Rausand, M., 1991

stora som mindre system och kan även inkludera flera olika typer av risker. Metoden påminner i stor utsträckning om HAZOP och FMEA.[14]

2.2.3 Checklistor

Checklistor är en kvalitativ riskanalysmetod som används för att identifiera kända typer av riskkällor och för att kontrollera att regler och normer efterföljs. Checklistorna baseras på tidigare erfarenheter och är många gånger skräddarsydda för den enskilda anläggningen. Dock finns det ett antal checklistor som är av mer allmän karaktär. Den eller de som upprättar checklistorna måste vara väl insatta i det system som ska analyseras. För att sedan genomföra analysen med hjälp av checklistorna krävs varken djupare kunskaper om anläggningen eller erfarenhet av metoden.

Checklistor kan användas i samtliga stadier i en anläggnings livscykel såsom planläggning/utformning, konstruktion/uppbyggnad, inspektion/uppstart, under drift samt vid slutlig avstängning. En checklista är relativt enkel att använda och kan ge ett snabbt resultat vilket gör checklistor till en kostnadseffektiv analysmetod. Checklistor används ofta som en del i en mer djupgående riskanalys.[15,16]

2.2.4 Energianalys

Energianalys är en kvalitativ riskanalysmetod som används för att identifiera risker i ett system. För att identifiera riskerna används en metodik som bygger på att det alltid krävs någon form av energi för att skador ska uppstå. De skador som avses i denna metod är fysiska skador, framförallt på människor. Energianalysen bygger på att se till vilka eller vad som kan bli skadat (människa, utrustning etc.), identifiera de energier som kan ge upphov till skada samt ta hänsyn till de skyddsbarriärer som finns för att förhindra att skador uppstår. Vanligtvis delas systemet in i mindre delar för att få ett mer lättbearbetat material.

De energikällor som kan ge upphov till skador kan delas in i grupper som exempelvis potentiell energi, kinetisk energi, rörelseenergi, elektricitet, tryck, värme och kyla, brand och explosion, strålning, kemikalier och övrigt. Dessa grupper kan underlätta identifieringen av energikällorna. När energikällorna är identifierade görs en bedömning av hur stora och allvarliga skador respektive energikälla kan ge upphov till. Här tas hänsyn till vilka eventuella säkerhetsbarriärer som finns. Vanligtvis används en fyrgradig skala över hur stor risk energikällan bedöms utgöra. Slutligen ges förslag på förebyggande eller förbättrande åtgärder om riskerna inte är acceptabla.[17]

2.2.5 Felträdsanalys

Felträdsanalys är en kvantitativ riskanalysmetod som med hjälp av logiska diagram identifierar vilka mänskliga felhandlingar och tekniska felfunktioner som kan leda till en specifik oönskad händelse. Felträdsanalys baseras på ett felträd som anger förutsättningarna för att en specifik oönskad händelse ska inträffa. Denna specifika händelse kallas topphändelse. Med utgångspunkt från topphändelsen anges alla de händelser som kan leda till den oönskade händelsen. De händelser som är grundorsaker till topphändelsen utgör bashändelser i felträdet. Dessa felfunktioner eller felhändelser binds sedan till topphändelsen med så kallade logiska grindar. De logiska grindarna anger om en händelse orsakas av en eller flera andra händelser oberoende av varandra (så kallade eller-grindar) eller om det krävs en

[14] Harms-Ringdahl, L., 1996
[15] Kemikontoret, 2001
[16] Olsson, F., 1999
[17] Harms-Ringdahl, L., 1993

kombination av flera händelser (så kallade och-grindar). När samtliga kombinationer av händelser identifierats genomförs själva utvärderingen av felträdet. Vid beräkning av sannolikheten eller frekvensen för topphändelsen används ett antal räkneregler som är knutna till de logiska grindarna i felträdet.[18,19,20,21,22,23]

2.2.6 FMEA- Failure Mode and Effects Analysis

FMEA syftar till att identifiera möjliga feltillstånd (på engelska failure mode) hos enskilda komponenter i tekniska system och de effekter på systemet dessa feltillstånd medför. Genom en systematisk genomgång av ett systems komponenter kan de kritiska delarna inom systemet identifieras, analyseras och åtgärdas så att risken för feltillstånd reduceras. Enkelt uttryckt kan FMEA sägas utgöras av svaren på frågorna ”Vad kan gå fel hos denna komponent?” och ”Vad händer om denna komponent felfungerar?”. FMEA bygger på att samtliga komponenters tänkbara feltillstånd identifieras tillsammans med orsakerna till feltillstånden. FMEA är i huvudsak en kvalitativ riskanalysmetod var man identifierar komponenters tänkbara feltillstånd och dess effekter på systemet utan hänsyn till sannolikheten för att feltillstånden ska uppstå. Dock kan man i en FMEA försöka kvantifiera hur ofta feltillstånden uppstår. Detta görs ofta i system med komponenter vars felfunktioner är välkända och väl dokumenterade.[24,25,26,27,28,29,30]

2.2.7 Grovanalys

Grovanalysen syftar till att på ett övergripande plan kartlägga riskerna i ett system. Om grovanalysen utförs på ett system under projekteringsfasen ämnar analysen påvisa potentiella risker i systemet för att om möjligt undvika dem. I redan befintliga system används grovanalysen för att identifiera de risker som redan finns inbyggda i systemet i avsikt att eliminera eller åtminstone kontrollera dem. Grovanalysen bygger på att alla tänkbara scenarier diskuteras för att identifiera de risker som är förknippade med systemet. Varje risk som identifieras analyseras kvalitativt med avseende på händelseförlopp, möjliga orsaker, konsekvenser och förslag på förebyggande eller förbättrande åtgärder. Ibland görs även en grov uppskattning av sannolikhet för och konsekvenserna av händelseförloppet. Ofta används då en relativ skala som varierar från system till system.[31,32,33,34,35]

2.2.8 HAZOP – Hazard and Operability Analysis

HAZOP är en i huvudsak kvalitativ metod som används för att systematiskt kartlägga och identifiera de risker som kan påverka ett system säkerhetsmässigt och produktionsmässigt.

---

[18] Rausand, M., 1991
[19] Kemikontoret, 2001
[20] Kolluru, R., et al, 1996
[21] Harms-Ringdahl, L., 1993
[22] Andrews, J.D, Moss, T.R., 1993
[23] Taylor, J.R., 1993
[24] Rausand, M., 1991
[25] Andrews, J.D, Moss, T.R., 1993
[26] Taylor, J.R., 1993
[27] Kolluru, R., et al, 1996
[28] Harms-Ringdahl, L., 1993
[29] Kemikontoret, 2001
[30] US Department of Defence, 1977
[31] Andrews, J.D, Moss, T.R., 1993
[32] Kemikontoret, 2001
[33] Kolluru, R., et al, 1996
[34] Rausand, M., 1991
[35] Taylor, J.R., 1993

Förutom att identifiera riskerna beskrivs konsekvenserna till tänkbara scenarier och förslag till förbättringar tas fram. Vid en HAZOP- analys används vanligen ett flödesschema som utgångspunkt. Ett antal punkter i systemet väljs ut för att analyseras djupare. Med hjälp av så kallade ledord fastställs avvikelser i analyspunkterna som kan leda till riskfyllda konsekvenser. Slutligen försöker man finna möjliga orsaker till avvikelserna och ge förslag på åtgärder.[36,37,38,39,40,41,42]

2.2.9 HEAT- Human Error Analytical Taxonomy

HEAT syftar till att systematiskt utreda olycksfall och tillbud för att identifiera faktorer som kan leda till mänskliga fel i en processanläggning. Till metoden har en taxonomi utvecklats. Ett olycksfall eller tillbud används som utgångspunkt. Med ett frågeschema bearbetas taxonomin. Fasta svarsalternativ används och det finns handledning som ger detaljerat stöd. Metoden leder till en strukturerad kvalitativ beskrivning av förhållanden som påverkar frekvensen av mänskliga felhandlingar.[43]

2.2.10 Händelseträdsanalys

En Händelseträdsanalys bygger på att identifiera alla tänkbara händelsekedjor som följer en specifik starthändelse. Händelseträdsanalys är en kvalitativ metod med möjlighet att kvantifiera sannolikheten och/eller frekvensen för olika sluthändelser. Resultatet av analysen kan användas som en del i en djupare riskanalys eller som beslutsunderlag för nya eller förbättrade säkerhetssystem. Händelseträdsanalys baseras på ett händelseträd som visar utvecklingen av en oönskad händelse i kronologisk ordning med starthändelsen som utgångspunkt. Trädet förgrenar sig beroende på vilka möjliga följder en händelse kan få. Händelserna och följderna kan vara av såväl teknisk som mänsklig karaktär. En Händelseträdsanalys kan kombineras med en Felträdsanalys då felträdets topphändelse motsvarar starthändelsen i händelseträdet.[44,45,46,47]

2.2.11 Indexmetoder

Indexmetoderna syftar till att systematiskt gå igenom sektioner av verksamheten för att värdera och klassificera de risker som finns. Metoderna ger verksamheten ett betyg eller ett riskindex för varje sektion som sedan jämförs med varandra. De vanligaste indexmetoderna är Dow Fire and Explosion Index och ICI the Mond Index som används inom kemisk processindustri. Metodiken för indexmetoder är ungefär densamma och bygger på att riskerna klassificeras och värderas efter fastlagda regler och normer för respektive metod. De mått på riskerna som erhålls anges enligt en relativ skala. Resultatet ger en indikation om var högriskområdena finns i verksamheten och om riskreducerande åtgärder bör vidtagas. Metoderna kan också ge en vägledning om och var djupare riskanalyser bör genomföras.[48,49,50]

---

[36] Rausand, M., 1991
[37] Andrews, J.D, Moss, T.R., 1993
[38] Kolluru, R., et al, 1996
[39] Kemikontoret, 2001
[40] Harms-Ringdahl, L., 1993
[41] Nolan, D.P., 1994
[42] Redmill, F., et al, 1999
[43] Harms-Ringdahl, L., 1996
[44] Rausand, M., 1991
[45] Kolluru, R., et al, 1996
[46] Harms-Ringdahl, L., 1993
[47] Kemikontoret, 2001
[48] Kemikontoret, 2001

2.2.12 MIMIX- Method for investigation management impact to causes and consequenses

MIMIX syftar till att identifiera svagheter i organisatoriska rutiner och praxis för drift och underhåll. Ett urval av olycksscenarier studeras med hjälp av arbetarnas och ledningarnas beskrivningar av olika förhållanden. Fem till tio scenarier anses täcka de väsentligaste delarna av säkerheten. Metoden bygger på intervjuer med representanter från samtliga nivåer i organisationen. Handböcker med utförliga råd, kriterier och/eller checklistor finns att tillgå. Resultatet av den kvalitativa analysen är en mängd förslag på åtgärder för att förbättra rutiner för drift och underhåll.[51]

2.2.13 MORT - Management and Oversight Risk Tree

Management and Oversight Risk Tree (MORT) syftar i första hand till att analysera orsakerna till oönskade händelser som har inträffat eller som varit nära att inträffa, så kallade nästan-olyckor. Metoden används också för att värdera åtgärder och åtgärdsprogram för att förbättra säkerheten inom en verksamhet. MORT är en av få metoder som fokuserar på ledningens hantering av säkerhetsfrågorna och dess effekter på säkerheten.Vid användandet av metoden används det så kallade MORT-trädet som utgångspunkt i analysen. MORT-trädet är ett felträd som innehåller samma typ av logiska grindar som i Felträdsanalysen. I den användarmanual som finns till MORT-metodiken listas 1500 bashändelser som kan användas vid uppbyggnaden av trädet. Själva analysen består i att de olika faktorerna i MORT-trädet värderas som tillfredsställande eller ej tillfredsställande. Värderingen sker mot kriterier som anges i användarmanualen. När analysen genomförts sammanfattas resultaten i en separat rapport. Själva MORT-trädet är ett arbetsverktyg för att strukturera och förenkla analysen, inte ett formulär för rapportskrivningen.[52,53,54]

2.2.14 QRA – Quantitative Risk Analysis

QRA syftar till att genom konsekvens- och frekvensberäkningar erhålla ett absolut mått på hur stor risk en anläggning utgör för människor, miljö och egendom i anläggningens omgivning. QRA utgör i sig ingen egen metod utan kan mer sägas vara ett systematiskt tillvägagångssätt där ett stort antal modeller för identifiering och beräkning av risk används. Metodiken består av tre delar; identifiering av risk, beräkning av frekvenser och sannolikheter samt beräkning av konsekvenser. För andra tillämpningsområden, exempelvis inom miljö- och hälsoområdet, används en annan terminologi. En eller flera metoder kan användas för respektive del. Resultatet kan redovisas som risk för en enskild individ eller för en grupp människor inom ett visst område.[55,56]

2.2.15 RIA- Risk Influence Analysis

RIA syftar till att identifiera risker och värdera åtgärder för att reducera risknivån i komplexa sociotekniska system. Risker för ett antal olyckstyper analyseras med avseende på vad som påverkar dessa och vilka möjliga åtgärder som finns. Genom ett systematiskt användande av experters kvalitativa värderingar görs bedömningar av effekten av olika åtgärder. I analysen beaktas tre olika systemnivåer; total-, makro- och mikrosystem. Metoden resulterar bl.a. i en

[49] Harms-Ringdahl, L., 1993
[50] The Dow Chemical Company, 1987
[51] Harms-Ringdahl, L., 1996
[52] Harms-Ringdahl, L., 1993
[53] Rausand, M. 1991
[54] Kirwan, B. 1994
[55] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000
[56] Kolluru, R., et al, 1996

översikt av vilka förhållanden som påverkar risknivån, vilka förbättringar som kan reducera risknivån och en värdering av hur stor den riskreducerande effekten blir av olika åtgärder.[57]

2.2.16 Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden)

Syftet med riskanalysmetoden för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden) är att analysera och kvantifiera riskerna med transport av farligt gods på väg och järnväg mot bakgrund av svenska förhållanden. Metoden beaktar såväl sannolikheten för som konsekvensen av olyckor vid väg- respektive järnvägstransporter av farligt gods. Vidare syftar VTI-metoden också till att uppskatta kostnaden för farligtgodsolyckor. Metoden är avsedd för jämförelser mellan olika transportalternativ för lokala väg- och järnvägsavsnitt. För att kunna uppskatta det förväntade antalet farligtgodsolyckor på väg respektive järnväg görs dels beräkningar av olycksfrekvensen och dels skattningar av hur många av dessa olyckor som leder till utsläpp av det transporterade godset. För de olyckor med transport av farligt gods som leder till utsläpp av det transporterade godset görs en konsekvensanalys för att uppskatta de konsekvenser på människa, egendom och miljö som uppstår.[58,59,60,61,62,63,64]

2.2.17 SLIM- Success Likelihood Index Method

SLIM syftar till att ta fram ett index som representerar sannolikheterna för mänskliga felhandlingar vid arbetsuppgifter som är antingen rutinmässiga eller som kräver viss problemlösning. Metoden bygger på att ett antal PFS:s (Performance Shaping Factors), det vill säga de faktorer som påverkar sannolikheten för felhandlingar, identifieras tillsammans med de mänskliga felhandlingar som kan leda till det utvalda scenariot. Exempel på PFS är yttre eller individuella faktorer som t.ex. utbildning, tidspress och riskuppfattning. De mänskliga felhandlingarna graderas och PFS viktas beroende på dess betydelse i det aktuella scenariot. Genom att kombinera graderingen av de mänskliga felhandlingarna med viktningen av PFS erhålls indexet SLI (Success Likelihood Index).[65,66] Indexet som erhålls enligt ovan kan sedan räknas om och en värdering på den mänskliga tillförlitligheten fås fram.

2.2.18 SMORT- Safety Management and Organisation Review Technique

SMORT är ett koncept för säkerhetsstyrning. Metoden är kvalitativ och bygger på MORT-metodiken, men har arbetats om i förhållande till denna så att SMORT kan användas som ett verktyg för intern säkerhetsgranskning av verksamheter utan behov av externa specialister. SMORT syftar i första hand till att analysera orsakerna till oönskade händelser som har inträffat eller som har varit nära att inträffa, så kallade nästan-olyckor. Metoden kan också användas vid regelbundna revisioner av säkerheten inom en verksamhet. SMORT är avsedd att användas då det krävs en systematisk och objektiv genomgång av säkerheten. Metodiken bygger på intervjuer med personer på olika nivåer i den analyserade organisationen. Beroende på analysens omfattning genomförs intervjuer med personer för att granska allt från själva

[57] Harms-Ringdahl, L., 1996
[58] Lindberg, E., Morén, B., 1994
[59] Fredén, S., 1994 (a)
[60] Nilsson, G., 1994
[61] Helmersson, L., 1994
[62] Persson, U., Svarvar, P., 1994
[63] Fredén, S., 1994 (b)
[64] Räddningsverket, 1996
[65] Rausand, M. 1991
[66] Kirwan, B. 1994

händelseförloppet vid en olycka eller en nästan-olycka, till verksamhetens övergripande organisation och rutiner.[67]

2.2.19 THERP- Technique for Human Error Rate Prediction

THERP är en av de mest använda metoderna för att ta fram sannolikheter för mänsklig tillförlitlighet och värdera konsekvenserna av mänskliga felhandlingar. Metoden är ursprungligen framtagen för en kvantitativ analys men kan också användas för att identifiera händelsekedjor som följer en felhandling. Metoden bygger på händelseträdsmetodik för att redovisa varje steg av arbetsmomentet.[68,69,70]

2.2.20 ”What-If”-analys

”What-If”-analys eller ”Vad händer om”-analys är en kvalitativ metod för att systematiskt kartlägga och identifiera de risker som finns i ett system. Metoden syftar till att identifiera möjliga oplanerade händelser inom ett system och orsakerna till dessa samt att utröna om händelserna kan leda till skador på eller inom systemet. ”What-If”-metoden bygger på att man ifrågasätter funktionen hos enskilda komponenter eller delar av ett system. Genom att analysera tänkbara avvikelser från ett systems planerade funktion föreslås förebyggande åtgärder. Det vanligaste användningsområdet för ”What-If”-metoden är vid riskvärdering i samband med en förändring av en process eller aktivitet inom den tekniska industrin. Även vid designstadiet/utformningen av ett system eller i ett redan existerande system används ”What-If”-analys.[71,72,73,74]

2.3 Indelning av riskanalysmetoderna

Riskanalysmetoderna kan delas in på olika sätt beroende på utformning och syfte med analysen. För att åskådliggöra vilka analysmetodernas användningsområde är kan de delas in i tre kategorier; mänsklig tillförlitlighet, tekniska system och organisationsstruktur (se Tabell 1).

Tabell 1. Indelning av riskanalysmetoder efter användningsområde.

Mänsklig tillförlitlighet	*Tekniska system*	*Organisationsstruktur*
AEA	Avvikelseanalys	Avvikelseanalys
Avvikelseanalys	Felträdsanalys	CRIOP
CRIOP	FMEA	HEAT
Felträdsanalys	Grovanalys	MIMIX
HEAT	HAZOP	MORT
Händesleträdsanalys	Händesleträdsanalys	RIA
RIA	Indexmetoder	SMORT
SLIM	QRA	
THERP	VTI-metoden	
	What If?	

[67] Kjellén, U., Tinmannsvik, R.K., 1989
[68] Harms-Ringdahl, L., 1993
[69] Kirwan, B. 1994
[70] Harms-Ringdahl, L., 1996
[71] Harms-Ringdahl, L., 1993
[72] Nolan, D., 1994
[73] Kolluru, R., et al, 1996
[74] Kemikontoret, 2001

Beroende på vilket underlag som finns att tillgå och vilken typ av resultat som eftersträvas kan metoderna delas in efter deras kvantifierbarhet (se Figur 1)

Checklistor	Indexmetoder	Felträdsanalys
Grovanalys	THERP	Händelseträdsanalys
HAZOP	FMEA	VTI-metoden
What If?	SLIM	QRA
MORT		
SMORT		
AEA		
Avvikelseanalys		
CRIOP		
HEAT		
MIMIX		
RIA		

Figur 1. Indelning av riskanalysmetoder efter grad av kvantifierbarhet.

2.4 Generellt om val av riskanalysmetod

Att välja lämplig riskanalysmetod är inte lätt. Ofta beror det på att syftet och målet med riskanalysen inte är tillräckligt tydligt formulerat. Då riskanalysen utgör ett beslutsunderlag är det viktigt att de frågor och frågeställningar som ska belysas med hjälp av riskanalysen klargörs för alla inblandade parter. Om inte beställaren av riskanalysen anger varför en riskanalys ska genomföras är risken uppenbar att utföraren av analysen inte vet vilken typ av metod som kan vara lämplig.

Vid val av riskanalysmetod måste det system som skall analyseras tydligt definieras. Det analyserade systemets karaktär är avgörande för val av riskanalysmetod. En annan av de faktorer som påverkar valet av riskanalysmetod är graden av detaljnivå som krävs i analysen. För en del frågeställningar är det tillräckligt att använda tämligen grova riskanalysmetoder medan det i andra situationer krävs avsevärt mer detaljerade analysmetoder. De grövre analyserna är kvalitativa i sin karaktär och kräver generellt sett mindre arbetsinsats och är därmed ofta mindre kostnadskrävande. I de fall då en kvalitativ uppskattning av riskerna inte är tillräcklig för att möjliggöra en tillfredsställande värdering av risknivån, krävs en mer detaljerad kvantitativ riskuppskattning. Generellt sett kan sägas att ju tidigare i riskhanteringsprocessen desto grövre metod är lämplig. Normalt används grovanalys som inledande riskanalysmetod för att identifiera de risker som behöver analyseras med hjälp av en mer detaljerad metod.

Ytterligare en faktor som är avgörande vid val av riskanalysmetod är tillgången till information om systemet. Ju mer detaljerad analysmetod desto mer information om det analyserade systemet krävs. För att genomföra en kvantitativ riskanalys krävs god tillgång till numeriska data för bland annat sannolikheten för olika händelser. Om dessa data inte finns att tillgå kan resultatet av analysen påverkas så mycket att värdet av analysen inte blir tillfredsställande. Då kanske en mer kvalitativ analys skulle ha gett ett bättre beslutsunderlag.

En avgörande faktor vid val av riskanalysmetod är vem som drabbas av konsekvenserna. Får en eventuell olycka konsekvenser för enbart den egna verksamheten eller kommer även omgivningen påverkas? Vid konsekvenser som endast berör den egna verksamheten kan generellt sett mindre omfattande kvalitativa analyser vara tillräckliga. Om däremot allmänheten berörs på ett påtagligt sätt krävs kvantitativa riskanalysmetoder[75].

Riskanalyser för processindustrin kan delas in i olika kategorier där olika metoder är lämpliga att använda; lågrisk, mellanrisk och högrisk[76]. Inom lågriskkategorin räcker det oftast med en översiktsanalys eller en grovanalys. I mellanriskkategorin genomförs lämpligen en enklare form av riskidentifierings- och konsekvensanalys, exempelvis What-If-analys, checklistor och enkla händelseträd. Högriskkategorin kräver en detaljerad form av riskidentifierings- och konsekvensanalys, exempelvis med hjälp av HAZOP, Operatörsanalys, FMEA, Felträdsanalys och QRA. De risk- och sårbarhetsanalyser som enligt KBM ska genomföras inom teknisk infrastruktur och transportområdet innehåller allvarliga kriser och händelser med risk för konsekvenser på omgivningen, det vill säga risker inom högriskkategorin.

2.5 Val av riskanalysmetoder för vidare analys inom valt område

De riskanalysmetoder som analyseras vidare med avseende på förhållandet mellan in- och utdata som i sin tur påverkar metodernas användbarhet och lämplighet som risk- och sårbarhetsanalys, ska uppfylla följande kriterier:

1. Metodiken ska vara kvantitativ till sin karaktär.
2. Analysresultatet ska ge ett absolut mått på risknivån hos det analyserade systemet.
3. Metoden ska vara tillämpbar för risk- och sårbarhetsanalys inom processindustri och/eller transport av farligt gods.

Med absolut mått på risknivån avses här att resultatet av analysmetoden utgörs av ett numeriskt värde på risknivån grundat på objektiva frekvens-/sannolikhets- och/eller konsekvensberäkningar. Med tillämpbar för risk- och sårbarhetsanalys avses här metod som beaktar möjliga händelser med konsekvenser för allmänheten.

Ovanstående kriterier har valts för att möjliggöra detaljerad analys med hjälp av matematiska modeller. De metoder som uppfyller ovanstående kriterier utgörs av Felträdsanalys, Händelseträdsanalys, QRA och VTI. De metoder som är kvantitativa till sin karaktär men inte uppfyller de andra kriterierna utgörs av FMEA, THERP, HAZOP, Indexmetoder och SLIM. FMEA kan visserligen kvantifieras men bedömningarna av sannolikhet och konsekvens görs för att möjliggöra inbördes rangordning mellan riskerna. THERP bygger på händelseträdsmetodik som valts ut för detaljerad analys. Indexmetoderna innehåller viss grad av kvantifiering men de numeriska värdena som knyts till riskerna används för att rangordna riskerna enligt en relativ skala. SLIM leder till ett index för att rangordna riskerna.

Beträffande risk- och sårbarhetsanalys krävs att de osäkerheter som ofrånkomligen medföljer hanteras på ett tillfredsställande sätt. Som grund för den vidare analysen av ovanstående analysmetoders lämplighet som metod för risk- och sårbarhetsanalys används ett allmänt resonemang om osäkerhetshantering och riskanalys.

[75] Jacobsson, A., 2002
[76] Kemikontoret, 1997

3 Osäkerheter i riskanalyser

Osäkerheter förekommer i alla riskanalyser. Om inte osäkerheterna funnits hade riskanalyser inte behövts då utfallet av situationen redan på förhand hade varit känt. Det finns många olika källor till osäkerheter och det är inte möjligt att identifiera och eliminera alla dessa. Istället måste osäkerheterna hanteras på ett tillfredsställande sätt så att resultatet av riskanalysen kan användas.

3.1 Olika typer av osäkerheter

De olika typerna av osäkerheter kan delas in på olika sätt. En uppdelning delar in osäkerheter i tre grupper; parameterosäkerhet, modellosäkerhet och osäkerhet beträffande huruvida alla bidragande risker i ett system identifierats[77,78]. Med parameterosäkerhet avses den osäkerhet som ligger i att värden på olika parametrar inte alltid är exakt kända. Modellosäkerhet härstammar från det faktum att alla modeller är förenklingar av den verklighet modellen avser beskriva. En annan uppdelning anger förutom parameter- och modellosäkerhet utfalls- eller variabelosäkerhet som en tredje grupp[79]. Denna tredje grupp innehåller osäkerheter om empiriska variationer och för att vara empirisk måste storheten vara mätbar.

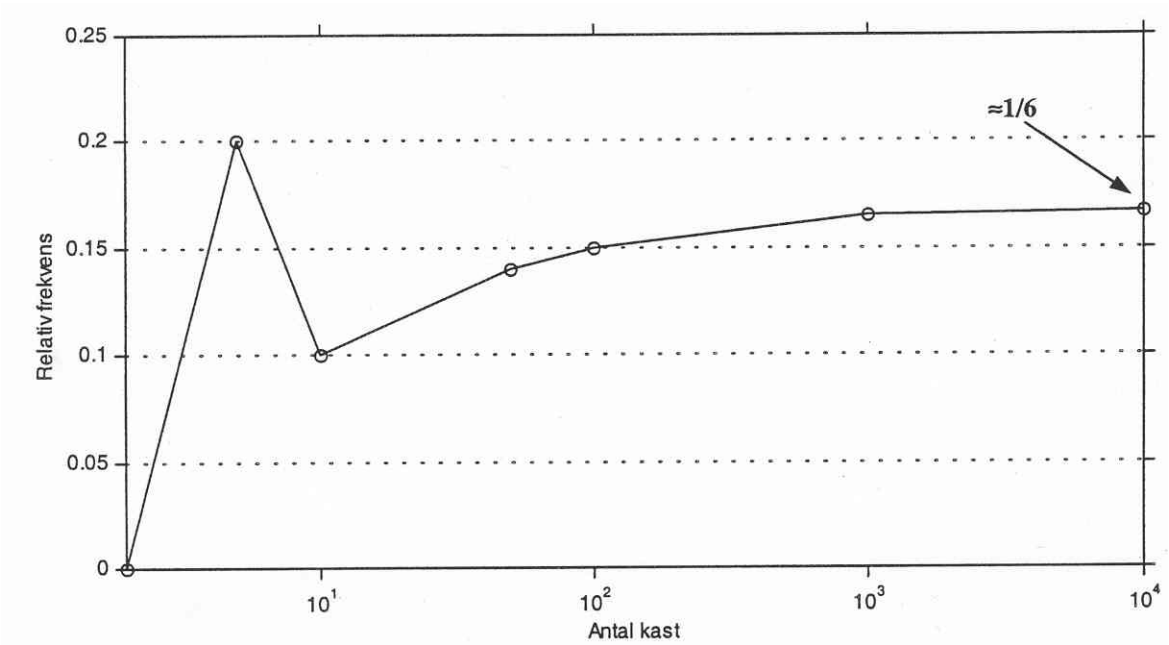
På en mer fundamental nivå delas osäkerheter in i två större grupper; stokastisk osäkerhet och kunskapsbaserad osäkerhet[80]. Stokastiska eller slumpmässiga osäkerheter beror på naturlig variation som exempelvis vindriktning och temperatur. Denna typ av osäkerhet är genuin, det vill säga icke reducerbar. Kunskapsbaserad osäkerhet härstammar från brist på kunskap och kan reduceras exempelvis genom ytterligare eller förfinade undersökningar. Ofta benämns stokastiska och kunskapsbaserade osäkerheter typ A- respektive typ B-osäkerheter[81].

3.2 Beskrivning av osäkerheter

För att kunna hantera osäkerheterna måste de först och främst kunna beskrivas och kvantifieras. Det vanligaste sättet att kvantifiera osäkerheter är det matematiska begreppet sannolikhet.

Det finns två olika tolkningar av sannolikhetsbegreppet; frekvenstolkningen och den bayesianska tolkningen[82]. Frekvenstolkningen innebär att den relativa frekvensen för en händelse kommer att närma sig ett visst värde på sannolikheten då antalet slumpmässiga försök är stort. Om exempelvis en tärning kastas är sannolikheten att det ska vara en etta 1/6. Vid många slumpmässiga försök, det vill säga att tärningen rullas ett antal gånger, kommer den relativa frekvensen slag där utfallet blir en etta att närma sig 1/6 (se Figur 2). Dock kan vid ett fåtal kast den relativa frekvensen variera kraftigt.

[77] Parry, G. W., 1998
[78] Committee for the Prevention of Disasters, 1997
[79] Mattson, B., 2000
[80] Abrahamsson, M., 2002
[81] Frantzich, H., 1998
[82] Johansson, H., 2000



Figur 2. Relativ frekvens ettor vid större antal kast med tärning (från Johansson, H., 2000).

Vid användning av frekvenstolkningen råder det normalt sett inga tvivel om vad sannolikheten för en viss händelse är. Sannolikheten benämns därför vara objektiv. Den objektiva sannolikheten som är resultatet av mätning av ett fenomen eller en händelse anges ofta med konfidensintervall med olika konfidensgrad, exempelvis 0,95 eller 0,99. En konfidensgrad på 0,95 eller 0,99 innebär att sannolikheten för att konfidensintervallet innefattar det ”sanna” parametervärdet är 0,95 respektive 0,99.

Motsatsen till objektiva sannolikheter, subjektiva sannolikheter, används i den bayesianska tolkningen av sannolikhetsbegreppet. I denna tolkning ses sannolikheten för en händelse som ett mått på hur troligt en person bedömer det är att händelsen kommer att inträffa, givet all relevant information som personen för tillfället besitter. Benämningen subjektiva sannolikheter kommer alltså av att olika personer kan skatta olika sannolikheter för samma händelse då sannolikheten för händelsen beror på graden av information. Den bayesianska tolkningen innehåller således ingen ”rätt” sannolikhet utan sannolikheten beror på vem som gör skattningen.

Det kan tyckas att det bayesianska sättet att betrakta sannolikheter är osäkert eftersom två riskanalyser på samma system men utförda av olika personer kan ge olika resultat. Den bayesianska tolkningen kan dock hantera situationer där sannolikheter av praktiska skäl inte kan skattas med hjälp av frekvenstolkningen. Exempel på sådana situationer är i fall med mycket knapphändigt eller obefintligt statistiskt material. I dessa situationer finns när det gäller den bayesianska tolkningen av sannolikhetsbegreppet en användbar metod där man med hjälp av ny information uppdaterar och förbättrar subjektiva skattningar. Metoden kallas Bayesiansk uppdatering. Redan en begränsad mängd statistik kan användas för att väsentligt förbättra den ursprungliga skattningen. I takt med att ny information uppdaterar den subjektiva skattningen kommer olika ursprungliga skattningar att närma sig ett och samma värde vilket gör att graden av subjektivitet minskar allt eftersom.

3.3 Metoder för hantering av osäkerheter

3.3.1 Känslighetsanalys

Känslighetsanalys är en av de grövre metoderna för hantering av osäkerheter. Den syftar till att identifiera de viktigaste variablerna i modellen, det vill säga de variabler som har störst inverkan på modellens resultat. Känslighetsanalys genomförs oftast genom att variera en parameter i taget medan ursprungsvärdet behålls för övriga parametrar. På detta sätt pekas de variabler med störst inverkan på resultatet ut. Med hjälp av känslighetsanalys kvantifieras dock inte de olika variablernas osäkerheter. Om en mer noggrann hantering av osäkerheterna eftersträvas bör noggrannare osäkerhetsanalys genomföras för de tongivande variablerna. Resultatet av en känslighetsanalys bör användas så att ett konservativt värde används på de parametrar som identifierats som viktigast för resultatet[83].

3.3.2 Gaussapproximationer och Taylorutveckling

En av nackdelarna med känslighetsanalys är att metoden inte tar hänsyn till osäkerheterna i de enskilda variablerna. En variabel med liten känslighet för resultatet och stor osäkerhet kan i vissa fall vara viktigare än en variabel med större känslighet men mindre osäkerhet. Den enklaste metoden för osäkerhetsanalys som hanterar både känslighet och osäkerhet är första ordningens approximation eller Gaussapproximation[84]. Gaussapproximation bygger på det matematiska konceptet Taylorutveckling. Fördelen med denna metod är att de olika variablernas medelvärde respektive standardavvikelse används för att beräkna medelvärdet och standardavvikelsen för utdatan, vilket medför att ingen specificerad fördelning behövs för de olika varablerna. I själva verket används variansen som är lika med kvadraten på standardavvikelsen. Vid osäkerhetshantering av det enkla uttrycket

$$Y = y(x_1, x_2) \qquad 1$$

anger variansen hos utdatan, Var (y), den totala osäkerheten och beräknas med hjälp av Gaussisk approximation enligt

$$Var[y] \approx \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_1} \right]^2_{X^0} Var[x_1] \right) + \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_2} \right]^2_{X^0} Var[x_2] \right) \qquad 2$$

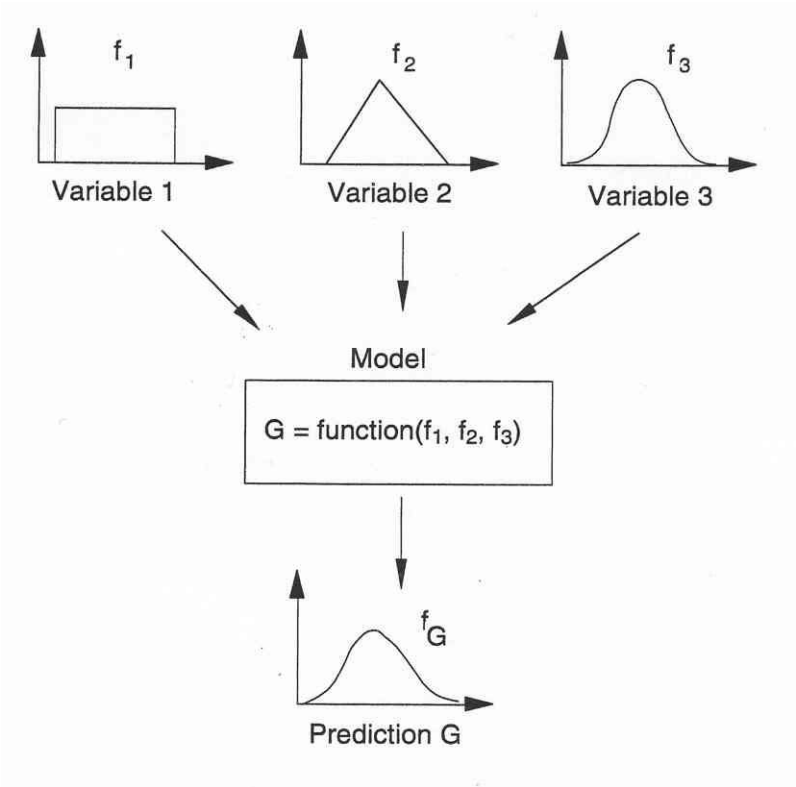
Derivatan beräknas för värden (X_0) som ligger nära medelvärdet. Gaussapproximationen enligt ovan kan användas om uttrycket Y är någorlunda linjär och om x_1 och x_2 är okorrelerade. Metoden ger en bra bild av osäkerheternas omfattning i fall med enkla förhållanden mellan olika variabler eller i de fall där osäkerheterna är små, det vill säga med liten varians. För mer komplexa förhållanden och större osäkerheter behövs noggrannare metoder för hantering av osäkerheter. Begränsningarna i metoden ligger i att för komplexa förhållanden blir beräkningarna alltför omfattande. Exempelvis kan datorstödda metoder som Monte Carlo-analys användas då beräkningarna blir alltför intensiva och omfattande.

3.3.3 Monte Carlo-analys

Monte Carlo-analys är en numerisk metod för hantering av osäkerheter. Metoden använder sannolikhetsfördelningar för att beskriva de ingående parametrarna i en modell. Med hjälp av ett stort antal beräkningar eller simuleringar där varje parameter tillskrivs ett enstaka värde

[83] Frantzich, H., 1998
[84] Morgan, G.M., Henrion, M., 1990

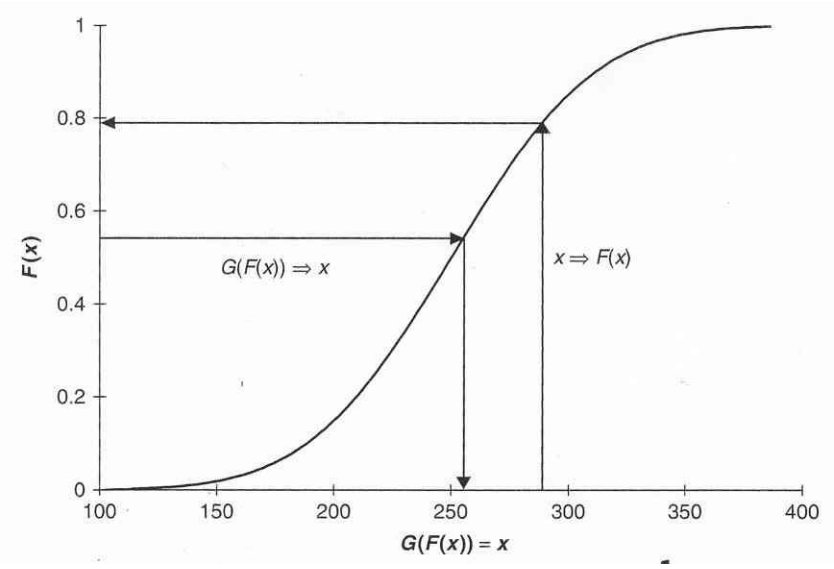
från respektive fördelning erhålls modellens utdata i form av en fördelning. Varje simulering kan ses som en observation och därför kan resultatet av en Monte Carlo-analys behandlas med hjälp av statistiska verktyg och hjälpmedel[85]. För varje simulering används ett värde från varje parameters fördelning och för att dra ett slumpmässigt värde används olika samplingsmetoder (se Figur 3).



Figur 3. Principskiss av Monte Carlo-analys (från International Atomic Energy Agency, 1989).

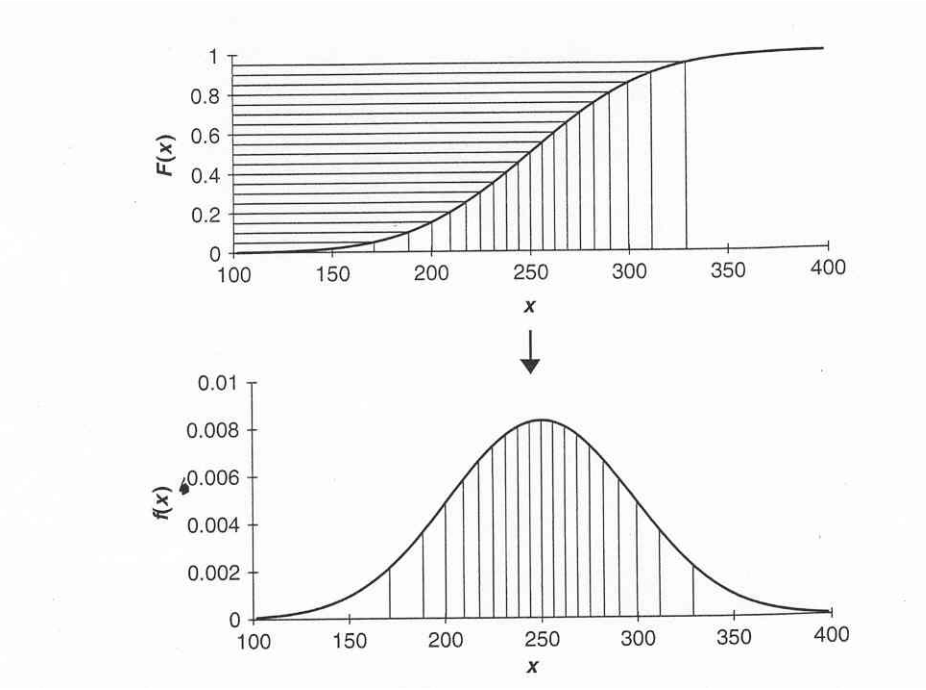
De vanligaste samplingsmetoderna kallas Monte Carlo-sampling (MC) och Latin Hypercube Sampling (LHS)[86]. MC eller Simple Random Sampling (SRS) som den också kallas är en enkel samplingsmetod där ett värde på varje parameter slumpmässigt dras med hjälp av en kumulativ fördelningsfunktion (CDF)[87]. På grund av kurvans lutning i CDF blir det en koncentration av mittenvärden om värdena dras helt slumpmässigt (se Figur 4), det vill säga det är svårt att i simuleringen få med inverkan av värden som ligger långt ut i fördelningarnas "svansar".

[85] Ang A.H-S., Tang, W.H., 1975
[86] Vose, D., 2000
[87] International Atomic Energy Agency, 1989



Figur 4. Exempel på sampling med hjälp av Monte Carlo-sampling (från Vose, D., 2000).

För att komma tillrätta med denna snedfördelning av de slumpmässiga värdena används ofta LHS som samplingsmetod istället. I denna samplingsmetod delas fördelningen in i intervall. Vid simulering dras värden så att de fördelas jämnt i de olika intervallen. På detta sätt får man en jämnare fördelning av de slumpmässiga värdena (se Figur 5). Nackdelen med LHS är att data fabriceras och inte motsvarar en verklig situation. Dock är LHS den mest utbredda samplingsmetoden.



Figur 5. Exempel på sampling med hjälp av Latin Hypercube Sampling (från Vose, D., 2000).

Genom att ange resultatet av beräkningarna som en sannolikhetsfördelning och inte som ett enstaka värde illustreras osäkerheterna i indata som fortplantas genom modellen på ett tydligt sätt.

3.4 Olika nivåer av osäkerhetshantering

Osäkerheter kan, som ovan beskrivits, behandlas på olika sätt med hjälp av olika metoder. Beroende på beslutssituationen ställs olika krav på hur osäkerheterna i riskanalyser bör hanteras. I vissa situationer kan det vara tillräckligt med en grov metod för osäkerhetshantering medan det i andra fall krävs en mer noggrann analys. En indelning av osäkerhetshanteringens omfattning kan göras i sex nivåer där nivå 0 är den minst omfattande och nivå 5 den mest avancerade formen av osäkerhetsanalys[88].

Nivå 0: Identifiering av riskkällor och felfunktioner. Nivå 0 innebär en identifiering av riskkällor och felfunktioner utan någon form av kvantifiering av vare sig sannolikhet eller konsekvens. Analys på denna nivå används i situationer där relationen mellan risk och kostnad för riskeliminering gör beslutet självklart. Exempelvis behövs ingen genomgripande analys för att bygga ett staket runt en damm för att hindra barn att trilla i. Många traditionella riskanalyser som exempelvis FMEA räknas till denna nivå.

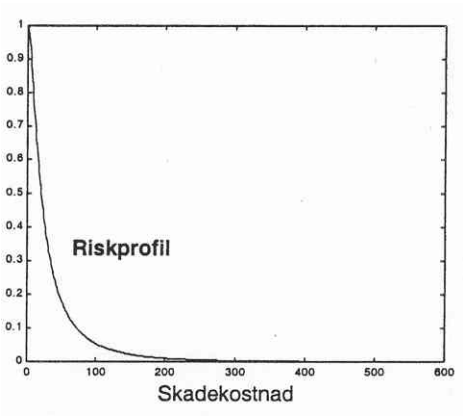
Nivå 1: Värsta tänkbara scenario. Nivå 1 innebär det värsta tänkbara scenariot för ett system. Ingen hänsyn tas till sannolikheten för att scenariot ska uppkomma utan riskbedömningen grundas endast på de mest omfattande konsekvenserna som kan uppstå. I praktiken är det dock svårt att uppskatta den allra värsta kombinationen av händelser med maximalt ogynnsamma omständigheter.

Nivå 2: Rimligt värsta tänkbara scenario. Denna nivå innebär att det värsta scenariot som anses vara rimligt uppstår. Vad som anses rimligt i olika situationer kan vara svårt att definiera och därför används denna typ av analys i de fall då det värsta scenariot inte kan definieras eller när det värsta scenariot är så osannolikt att det är meningslöst att använda det. Oftast görs inga kvantitativa sannolikhetsskattningar på denna nivå. Exempel på denna nivå är dimensionering av åtgärder mot jordbävningar och hundraårsstormar.

Nivå 3: Bästa uppskattning och centrala värden för sannolikheter och konsekvenser. På nivå 3 hanteras osäkerheterna genom att de mest troliga värdena på respektive parameter skattas. I vissa fall kan dock det mest troliga värdet ge ett missvisande underlag eftersom händelser med låg sannolikhet i dessa fall inte beaktas. Därför används ofta skattningar av centrala värden såsom medelvärde eller medianvärde. Detta tillvägagångssätt ger en balans mellan yttervärden men ger ingen kännedom om extremvärdena i sig. De flesta kvantitativa riskanalyser ligger på denna nivå av osäkerhetshantering.

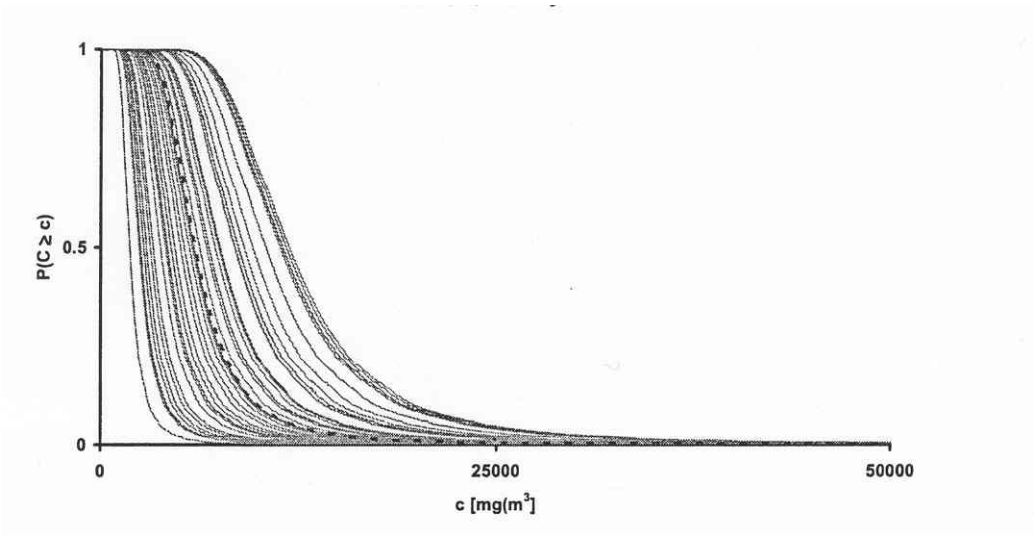
Nivå 4: Probabilistisk riskbedömning med en riskprofil. På lägre nivåer av osäkerhetshantering används ett enda värde i analysen. Nivå 4 medför användningen av probabilistiska riskvärderingsmetoder för att hantera osäkerheterna. Detta innebär att fördelningar används för att representera risk istället för enstaka värden. För att beskriva konsekvenserna i relation till sannolikheten används en kumulativ komplementär fördelningsfunktion (CCDF) eller riskprofil. Riskprofilen utgörs på denna nivå endast av en enda kurva vilket gör att det inte går att särskilja olika typer av osäkerhet (se Figur 6). En vanlig metod för hantering av osäkerheter på denna nivå är Monte Carlo-analys.

[88] Paté-Cornell, M.E., 1996



Figur 6. Exempel på osäkerhetshantering på nivå 4 (från Johansson, H., 2000).

Nivå 5: Probabilistisk riskbedömning med flera riskprofiler. Liksom på föregående nivå används på nivå 5 probabilistiska riskvärderingsmetoder för att hantera osäkerheterna och fördelningar används istället för enstaka värden. På nivå 5 används flera riskprofiler vilket tillåter att kunskapsosäkerheter och stokastiska osäkerheter separeras (se Figur 7). På denna nivå av osäkerhetshantering är kvantifiering av osäkerheter är en förutsättning och metoder som används är exempelvis tvåfas Monte Carlo-simulering och Bayesiansk uppdatering.



Figur 7. Exempel på osäkerhetshantering på nivå 5 (från Abrahamsson, M., 2002).

4 Felträdsanalys

4.1 Metodbeskrivning

4.1.1 Bakgrund och syfte

Felträdsanalys är en analysmetod som med hjälp av logiska diagram identifierar vilka felhandlingar eller felfunktioner som kan orsaka en specifik händelse. Metoden utvecklades på 1960-talet inom rymdindustrin och är idag en av de mest använda riskanalysmetoderna inom många olika områden. Ofta används metoden som en fördjupad analysmetod efter de mer övergripande grov-, ”What-If”- eller HAZOP-analyserna. Felträdsanalys är en metod som kan användas i tekniska system för att erhålla frekvenser för olyckor med allvarliga konsekvenser med stor påverkan på samhällets sårbarhet, exempelvis på kärnkraftverk.

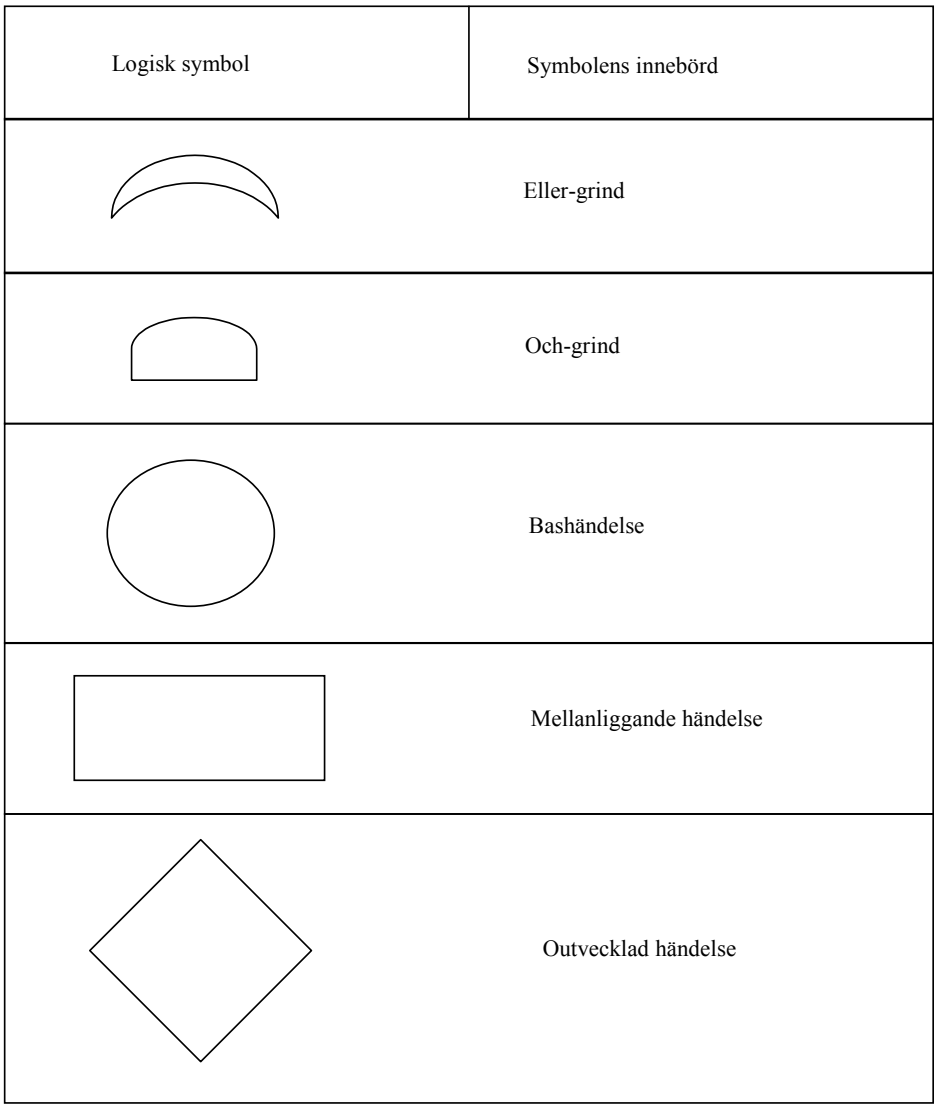
Felträdsanalys syftar till att identifiera orsaken till specifika oönskade händelser. Den specifika oönskade händelsen, den så kallade topphändelsen, fungerar som utgångspunkt i analysen i vilken man härleder vilka felhandlingar och felfunktioner som kan orsaka topphändelsen. Det logiska diagrammet eller felträdet som utgör basen i analysen ger en översiktlig bild av vilka händelser eller kombinationer av händelser som kan orsaka topphändelsen.

4.1.2 Arbetsgång

Felträdsanalys baseras på ett felträd som anger förutsättningarna för att en specifik oönskad händelse ska inträffa. Denna specifika händelse kallas topphändelse och kan exempelvis utgöras av en skenande reaktor eller att säkerhetssystemet inte fungerar. De händelser som identifieras som grundorsaker till topphändelsen utgör bashändelser i felträdet. Däremellan kan ett antal händelser som kan leda till topphändelsen placeras.

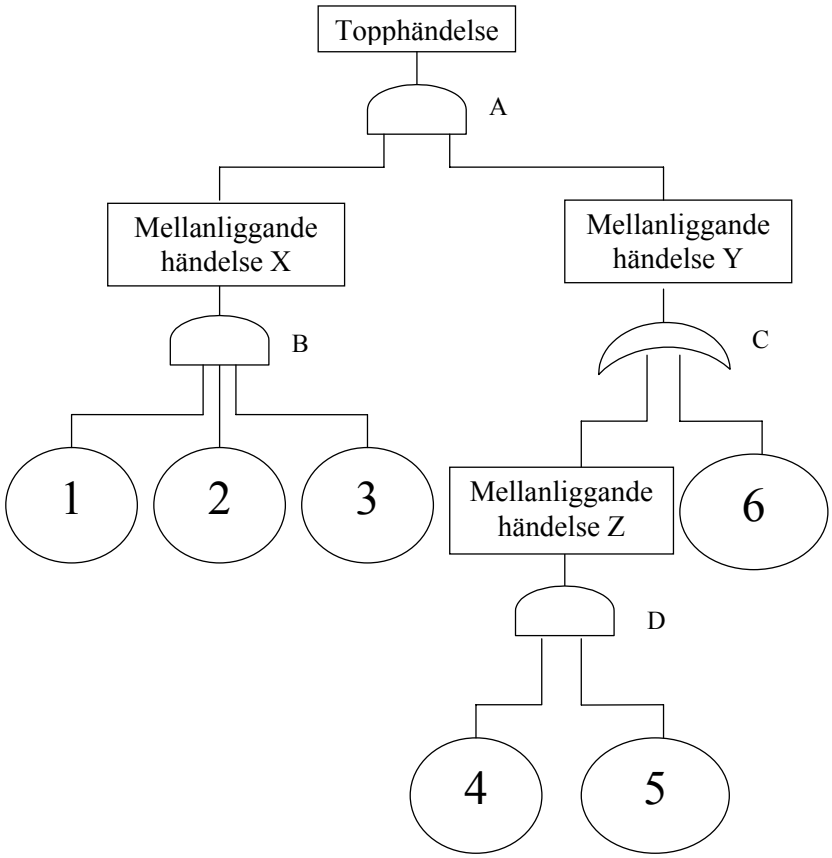
Första steget i en Felträdsanalys är att konstruera själva felträdet. Inledningsvis definieras den oönskade händelsen som ämnas analyseras. Topphändelsen kan väljas på olika nivåer i ett system. En avvikelse från ett helt systems funktion kan väljas som topphändelse lika väl som en felfunktion hos en enskild komponent. Om flera oönskade händelser ska analyseras skapas ett felträd för varje händelse.

Med utgångspunkt från topphändelsen anges alla de felfunktioner eller felhändelser som kan leda till topphändelsen. Dessa felfunktioner eller felhändelser binds sedan till topphändelsen med så kallade logiska grindar. De logiska grindarna anger om en händelse orsakas av en eller flera andra händelser oberoende av varandra (så kallade eller-grindar) eller om det krävs en kombination av flera händelser (så kallade och-grindar). Grindarna och händelserna återges i felträdet med olika symboler beroende på grindarnas och händelsernas karaktär (se Figur 8).



Figur 8. Exempel på symboler i felträd.

De felfunktioner och felhändelser som angivits kunna leda till topphändelsen bryts sedan ned ytterligare efter vilka händelser som i sin tur kan orsaka dessa. På detta sätt skapas en trädstruktur av samtliga felfunktioner eller felhändelser som direkt eller indirekt kan orsaka topphändelsen (se Figur 9).



Figur 9. Exempel på felträd.

Topphändelsen kan orsakas av en mängd olika kombinationer av händelser. För att identifiera vilka dessa kombinationer är används en metod där man tar fram så kallade cut sets. Ett cut set (CS) är en specifik kombination av händelser som kan leda till topphändelsen. När kombinationerna av bashändelser identifierats sker själva utvärderingen av felträdet där sannolikheten/frekvensen för topphändelsen räknas fram. Det görs med hjälp av sannolikhets-/frekvensberäkningar och räkneregler som är knutna till de grindar som finns i felträdet.

4.1.3 Beräkning av förväntat värde på topphändelsen

För att beräkna topphändelsens sannolikhet/frekvens används räkneregler för de olika grindarna. Ingående parametrar i och-grindar kan uttryckas både som frekvenser (z) och sannolikheter (P), medan motsvarande indata i eller-grindar uttrycks i antingen frekvenser eller sannolikheter. För och-grindar gäller följande räkneregler[89]:

$$P_{ut} = P_1 * P_2 * \ldots * P_n$$

$$z_{ut} = z_1 * P_2 * \ldots * P_n$$

[89] Olsson, F., 1999, s. 16

För eller-grindar gäller följande räkneregler[90]:

$$z_{ut} = z_1 + z_2 + \ldots + z_n$$

$$P_{ut} = P_1 + P_2 - (P_1 * P_2)$$

I ovanstående exempel på felträd kan det förväntade värdet på topphändelsen uttryckas som:

Topphändelsen $= P_X * P_Y$
där $P_X = P_1 * P_2 * P_3$
$P_Y = P_Z + P_6 - (P_Z * P_6)$
$P_Z = P_4 * P_5$
$\Rightarrow$
Topphändelsen =
$(P_1 * P_2 * P_3) * ((P_4 * P_5) + P_6 - (P_4 * P_5 * P_6))$

4.2 Analys av förhållandet mellan in- och utdata

4.2.1 Variation av indata och resultat

Genom att variera indata i metoden kan kvaliteten på utdata undersökas för att avgöra om metoden är lämplig eller ej för risk- och sårbarhetsanalys.

Felträdets beräkningsmetodik innehåller enkla matematiska förhållanden. Vid och-grindar används endast multiplikation av de ingående parametrarna för beräkning av händelsernas frekvens eller sannolikhet, medan addition och subtraktion tillsammans med multiplikation används vid eller-grindar. Mot bakgrund av de enkla matematiska förhållanden skulle en generell känslighets- och osäkerhetsanalys inte ge mer information om metodens lämplighet än en generell diskussion om hur kvaliteten på indata påverkar resultatet. Med anledning av detta görs för felträd inga illustrerande beräkningar utan endast en generell diskussion förs.

Vid och-grindar har de olika händelserna som knyts samman i en grind lika stor inverkan på resultatet i förhållande till varandra på grund av multiplikation mellan de olika händelserna. Däremot har olika händelser på olika nivå i trädet olika stor inverkan på resultatet. Detta på grund av att ju längre ned i trädet händelsen ligger, desto fler händelser multipliceras. Därmed spelar osäkerheter i indata mindre roll ju större trädet är och ju längre ned i trädet de osäkra variablerna finns. Med andra ord är bashändelser som kommer in i felträdet nära topphändelsen kritiska då osäkerheter i dessa parametrar har stor inverkan på slutresultatets kvalitet.

För eller-grindar är förhållandet mellan olika parametrar lite annorlunda. Räknereglerna för eller-grindar innehåller såväl addition som multiplikation och subtraktion. Ofta kan man dock bortse ifrån den term, bestående av multiplicerade faktorer, som subtraheras eftersom den vanligtvis är så liten att den kan försummas utan påverkan på resultatet. Då frekvenserna/sannolikheterna adderas vid eller-grindar är stora skillnader i storlek på dessa av stor betydelse. Om den ena termen är väldigt mycket större än den/de andra spelar osäkerheterna i den större termen en mer betydande roll i beräkningarna.

[90] Olsson, F., 1999, s. 16

4.2.2 Slutsats och diskussion kring felträdsmetodikens lämplighet

Det finns stora svårigheter med att göra en generell analys av hur viktig en enskild parameter är för resultatet då felträdens utformning och omfattning varierar stort mellan olika analysobjekt. De faktorer som avgör hur stor betydelse en viss parameter har för slutresultatet är storleken på trädet, var i trädet parametern befinner sig samt vilken typ av logisk grind som parametern är bunden till. Ju större träd och ju längre ner i trädets förgreningar desto mindre roll spelar variationer i den enskilda parametern för slutresultatet.

Beräkningsmetodiken i Felträdsanalysen bygger på klassiska statistiska räkneregler och mot bakgrund av ovanstående analys finns ingen anledning att ifrågasätta dess giltighet. Metoden har utvecklats och använts under lång tid där kontinuerliga förbättringar har lett till att metoden ofta ger en bra bild av verkligheten. Problemet med felträd ligger inte i beräkningsmodellerna utan i svårigheterna med att identifiera alla möjliga händelser och dess sannolikheter/frekvenser. Metoden som sådan innehåller ingen garanti för att samtliga felhändelser är identifierade och inte heller för att ”rätt” sannolikhet/frekvens angivits. Ett tydligt exempel på att det är svårt att ange ”rätt” sannolikheter/frekvenser är ASSURANCE-studien[91]. En viktig del av denna studie bestod i att sju olika grupper genomförde frekvensuppskattningar av elva möjliga scenarier vid ammoniakhantering. Resultatet av dessa uppskattningar visade på stora variationer i uppskattade frekvenser (se Tabell 3).

Tabell 2. Resultat från frekvensuppskattningar i ASSURANCE-studien.

Scenario	*Beskrivning av scenario*	*Variationsområde för frekvensuppskattningar*
1	Stort läckage från matarledning (8”)	$1{,}8*10^{-7} – 1{,}4*10^{-5}$
2	Rörbrott (4”)	$7{,}3*10^{-7} – 1{,}4*10^{-5}$
3	Hål eller lossnade rörledningar	$4{,}8*10^{-6} – 1{,}4*10^{-3}$
4	Rörbrott (10”)	$8{,}0*10^{-7} – 4{,}6*10^{-6}$
5	Läckage från tankfartyg	$6{,}4*10^{-10} – 5{,}7*10^{-5}$
6	Mycket stort hål på cistern	$1{,}0*10^{-8} – 5{,}0*10^{-7}$
7	Rörbrott (20”)	$4{,}0*10^{-7} – 6{,}0*10^{-6}$
8	Mycket stort hål på trycksatt cistern	$4{,}5*10^{-7} – 1{,}3*10^{-5}$
9	Rörbrott (4”), trycksatt	$3{,}4*10^{-7} – 1{,}5*10^{-5}$
10	Hål eller lossnade rörledningar, trycksatt	$1{,}5*10^{-7} – 2{,}1*10^{-3}$
11	Mycket stort hål på lastbilstank	$1{,}5*10^{-9} – 4{,}7*10^{-6}$

För förbättra användningen av Felträdsanalysmetoden krävs således hjälp för att identifiera samtliga felhandlingar och felfunktioner. Vidare krävs tillgång till tillförlitliga data för felhändelsernas sannolikhet/frekvens alternativt metoder för hur man ska hantera osäkra eller obefintliga indata. Framför allt är avsaknaden av information beträffande mänsklig tillförlitlighet och hur organisatoriska åtgärder påverkar sannolikhet/frekvens för olika händelser avgörande. Trots dessa förbättringsmöjligheter anses metoden vara lämplig för risk- och sårbarhetsanalys, i synnerhet för mindre komplexa och tydligt avgränsade system där osäkerheterna i indata är hanterbara. Vid användandet av Felträdsanalys som metod för risk- och sårbarhetsanalys bör osäkerhetsanalys genomföras på Nivå 4 eller 5 enligt avsnitt 3.4.

[91] Lauridsen, K., et al, 2001

5 Händelseträdsanalys

5.1 Metodbeskrivning

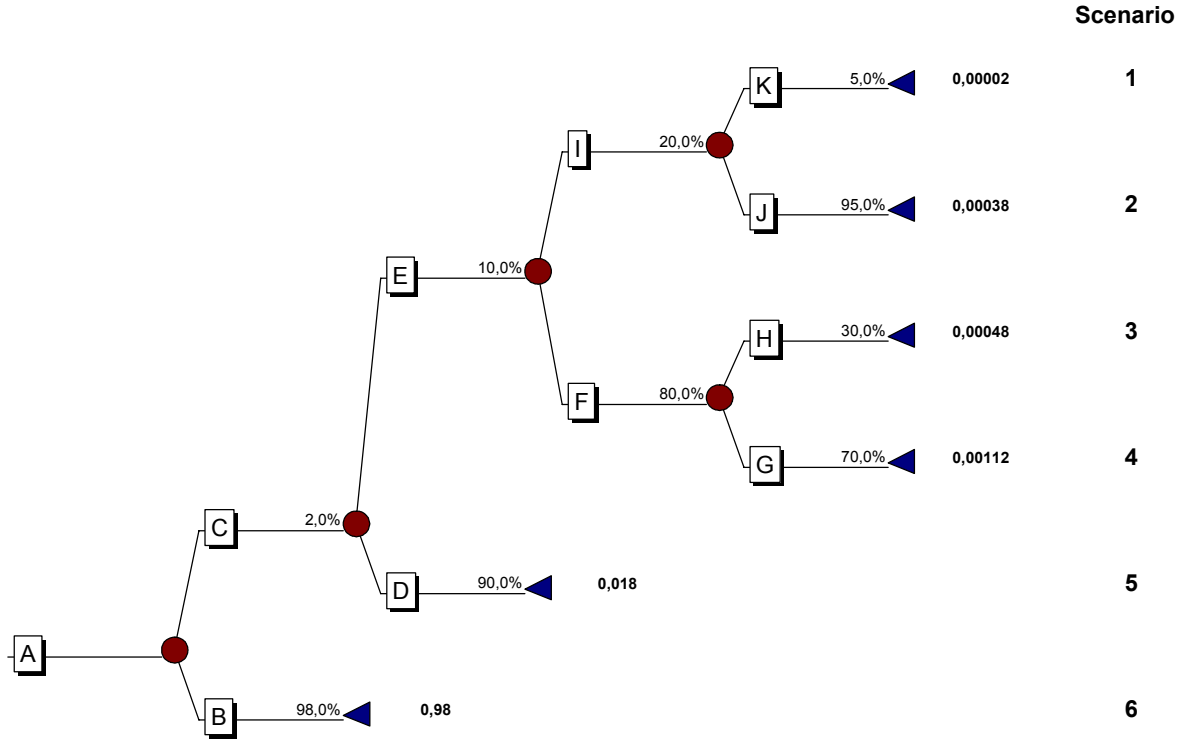
5.1.1 Bakgrund och syfte

Händelsträdsanalys syftar till att få en klar bild över tänkbara scenarier som en händelse kan leda till. Det erhålls genom att identifiera de händelsekedjor som följer en specifik starthändelse. Händelserna och följderna kan vara av såväl teknisk som mänsklig karaktär. Är sannolikheterna/frekvenserna kända för samtliga delhändelser i händelseförloppet som studeras kan sannolikheten/frekvenserna för förväntade sluthändelser beräknas.

Målet med en Händelseträdsanalys är att få en lättöverskådlig bild över tänkbara skadeförlopp som följer en viss starthändelse. Detta resultat kan sedan användas som en del i en djupare riskanalys eller som beslutsunderlag för nya eller förbättrade säkerhetssystem.

5.1.2 Arbetsgång

Händelseträdsanalys baseras på ett händelseträd som visar utvecklingen av en oönskad händelse i kronologisk ordning med starthändelsen som utgångspunkt. Trädet förgrenar sig beroende på vilka konsekvenser händelserna kan ge upphov till, exempelvis om säkerhetssystem eller andra åtgärder för att minska konsekvenserna av händelsen fungerar eller inte (se Figur 10). Under analysens gång behandlas operatörernas handlande, utrustningens och säkerhetssystemens funktioner m.m.



Figur 10. Exempel på händelseträd där starthändelsen A åsatts värdet 1 och delhändelsernas sannolikhet satts ut.

Arbetsgången för en Händelseträdsanalys inleds med att starthändelsen identifieras tillsammans med de säkerhetsfunktioner som finns för att minska eller förhindra

konsekvenserna av starthändelsen. Valet av starthändelsen är en mycket viktig del av analysen eftersom hela händelseförloppet är beroende av den. Starthändelsen kan vara en mänsklig felhandling eller brister i den tekniska utrustningen som kan ge upphov till ett antal olika konsekvensscenarier beroende på hur säkerhetssystem och operatörer reagerar på starthändelsen. Det är sällan självklart vilket starthändelse som ska väljas. De säkerhetsfunktioner som ska begränsa eller stoppa händelseförloppet av starthändelsen kan vara larm, detektorer, åtgärder som operatörer ska vidta och fysiska barriärer som invallning. Det gäller att identifiera samtliga säkerhetsfunktioner som kan påverka konsekvenserna av starthändelsen i kronologisk ordning.

Händelseträdet visar utvecklingen av olyckan i kronologisk ordning med starthändelsen som utgångspunkt. Trädet förgrenar sig sedan vid de olika säkerhetsfunktionerna i två eller flera grenar beroende på om säkerhetssystemet fungerar normalt, delvis eller inte alls. Händelseträdet kan också innehålla fler förgreningar, exempelvis olika storlekar på hål vid läckage och temperatur. Slutligen erhålls ett antal konsekvensscenarier som starthändelsen kan leda till. För att kvantifiera sluthändelsernas frekvens krävs att data finns tillgänglig för starthändelsens frekvens och de olika delhändelsernas sannolikhet/frekvens.

5.1.3 Beräkning av förväntat värde på sluthändelserna

För att beräkna det förväntade värdet för sluthändelserna multipliceras respektive grens ingående parametrar med varandra. För att illustrera hur kvantitativa värden kan tillskrivas de olika händelserna används exemplet i Figur 10. I exemplet anges sannolikheter för delhändelserna i procent. Genom att ange frekvensen för starthändelsen kan sluthändelsernas förväntade värde beräknas. Händelsekedjorna för de sex sluthändelserna anges i Tabell 3.

Tabell 3. Händelsekedjorna i exemplet.

Sluthändelse	*Händelsekedja*
1	A*C*E*I*K
2	A*C*E*I*J
3	A*C*E*F*H
4	A*C*E*F*G
5	A*C*D
6	A*B

5.2 Analys av förhållandet mellan in- och utdata

5.2.1 Variation av indata och resultat

Händelseträdets beräkningsmetodik innehåller enkla matematiska förhållanden i form av multiplikation. Mot bakgrund av dessa enkla matematiska förhållanden skulle en generell känslighets- och osäkerhetsanalys inte ge mer information om metodens lämplighet än en generell diskussion om hur kvaliteten på indata påverkar resultatet. Genom att i ett fiktivt händelseträd ange olika parametrars sannolikhet i form av fördelningar kan osäkerhetsanalys genomföras för att erhålla hur stora osäkerheterna är i respektive sluthändelses frekvens/sannolikhet. Dock skulle informationen om osäkerheterna vara svår att värdera vilket skulle leda till svårigheter med att avgöra om osäkerheterna är acceptabla eller ej. Med anledning av detta görs för händelseträd inga illustrerande beräkningar utan endast en generell diskussion förs.

Sluthändelsernas respektive sannolikhet eller frekvens erhålls genom att multiplicera grenens samtliga delhändelser. Det innebär att ju fler delhändelser som multipliceras desto mindre inverkan på resultatet får värdet på den enskilde delhändelsen. I och med att samtliga delhändelser multipliceras kommer inte heller delhändelsens placering i händelseträdet att påverka resultatet. De olika delhändelserna och dess osäkerheter har sinsemellan lika stor inverkan på resultatet.

5.2.2 Slutsats och diskussion kring händelseträdsmetodikens lämplighet

Den enda faktor som avgör hur stor betydelse en viss parameter har för slutresultatet är storleken på trädet; ju större träd desto mindre roll spelar variationer i den enskilda parametern för slutresultatet.

Vid analys av parametervärdenas osäkerheter i ett händelseträd uppstår problem då en förgrening innehåller fler än två grenar, det vill säga då fler än två parametervärden är beroende av varandra. Sannolikheterna för de olika grenarna ska summera till ett, vilket gör att vid två förgreningar kompletterar de bägge sannolikheterna varandra okomplicerat enligt $P_1 = 1 - P_2$. Vid fler förgreningar blir sannolikheterna $1 = P_3 + P_4 + P_5$ vilket medför en risk att sannolikheterna summerar till mer än ett då samtliga sannolikheter varierar. Detta är ett problem som bör beaktas vid användande av händelseträd.

Beräkningsmetodiken i Händelseträdsanalysen bygger på klassiska statistiska räkneregler och därför finns ingen anledning att ifrågasätta dess giltighet. Problemet med händelseträd ligger inte i beräkningsmodellerna utan svårigheter med att identifiera alla möjliga händelser, händelsernas kronologi samt dess sannolikheter/frekvenser. Metoden som sådan innehåller ingen garanti för att samtliga händelser är identifierade och inte heller för att ”rätt” sannolikheter/frekvenser angivits. För förbättra användningen av Händelseträdsanalysmetoden krävs således hjälp att identifiera samtliga händelser. Vidare krävs tillgång till tillförlitliga data för händelsernas sannolikhet/frekvens alternativt metoder för hur man ska hantera osäkra eller obefintliga indata. Framför allt är avsaknaden av information beträffande mänsklig tillförlitlighet och hur organisatoriska åtgärder påverkar sannolikhet/frekvens för olika händelser avgörande. Osäkerheter i samband med Händelseträdsanalys hanteras lämpligen enligt Nivå 4 eller 5 i avsnitt 3.4. Trots de förbättringsmöjligheter som nämnts ovan anses Händelseträdsanalys i likhet med Felträdsanalys vara lämplig för risk- och sårbarhetsanalys.

6 Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden)

6.1 Metodbeskrivning

6.1.1 Bakgrund och syfte

Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) har tagit fram en kvantitativ metod för att analysera risker förknippade med transporter av farligt gods. Metoden togs fram på uppdrag av bland annat Vägverket, Banverket och Räddningsverket i början på 1990-talet. Riskanalysmetoden för transporter av farligt gods på väg och järnväg (VTI-metoden) presenteras i en rapportserie från VTI[92,93,94,95,96,97]. Då dessa forskningsrapporter ansågs vara otillgängliga för den praktiska användaren har Statens Räddningsverk (SRV) utarbetat en handbok i vilken stegen i metodiken har renodlats och användaren ges stöd i form av exempel på beräkningsgången[98]. Det är handboken som analyseras och diskuteras i denna rapport.

VTI utvecklar på uppdrag av SRV ett datorprogram, FarGo, för att underlätta det praktiska beräkningsarbetet vid användning av VTI-metoden[99]. Detta arbete pågår och är planerat att vara färdigt december 2002[100]. Det finns en metod som i många avseenden kan ses som en uppdatering av den del av VTI-metoden som rör järnväg[101]. Denna metod är dock så ny att dess genomslag är begränsat.

Syftet med VTI-metoden är att analysera riskerna med transport av farligt gods på väg och järnväg mot bakgrund av svenska förhållanden. Metoden beaktar såväl sannolikheten för som konsekvensen av olyckor vid väg- respektive järnvägstransporter av farligt gods. Vidare syftar VTI-metoden också till att uppskatta kostnaden för farligtgodsolyckor. Metoden är avsedd för jämförelser mellan olika transportalternativ för lokala väg- och järnvägsavsnitt.

VTI-metoden består i själva verket av fyra olika delar; uppskattningen av det förväntade antalet farligtgodsolyckor för transport på väg respektive järnväg, konsekvensuppskattningen av dessa olyckor samt uppskattning av de samhällsekonomiska kostnader som kan förväntas uppstå till följd av farligtgodsolyckor. Den del av metoden som beaktar de ekonomiska aspekterna tas inte upp i denna rapport mot bakgrund av rapportens syfte.

6.1.2 Uppskattning av förväntat antal farligtgodsolyckor vid transport på väg med utsläpp

För att kunna uppskatta det förväntade antalet farligtgodsolyckor på väg görs dels beräkningar av olycksfrekvensen och dels skattningar av hur många av dessa olyckor som leder till utsläpp av det transporterade godset.

[92] Lindberg, E., Morén, B., 1994
[93] Fredén, S., 1994 (a)
[94] Nilsson, G., 1994
[95] Helmersson, L., 1994
[96] Persson, U., Svarvar, P., 1994
[97] Fredén, S., 1994 (b)
[98] Räddningsverket, 1996
[99] Hammar, L., Magnusson, K., 2002
[100] Postgård, U., 2002
[101] Fredén, S., 2001

Beräkningen inleds med att den aktuella transportsträckan delas in i delsträckor. För varje delsträcka kan det förväntade antalet olyckor vid transport av farligt gods uppskattas genom att utgå från antalet singel- och kollisionsolyckor för samtliga motorfordon på den aktuella transportsträckan och jämföra det med relationen mellan farligtgodstransporter och övrig trafik. Om inte olycksstatistik finns att tillgå skattas antalet olyckor med hjälp av den så kallade olyckskvoten för vägavsnittet. Olyckskvotens storlek samvarierar med ett antal variabler såsom vägtyp, hastighetsgräns, siktförhållanden samt vägens utformning och sträckning.

För att beräkna det förväntade antalet olyckor vid transport av farligt gods på väg används följande formel[102] som relaterar andelen farligtgodstransporter till andelen singel- och kollisionsolyckor för det aktuella vägavsnittet:

Antalet farligtgodstransporter i trafikolyckor per år $= O * ((Y * X) + (1-Y) * (2 * X - X^2))$

Där O = antalet trafikolyckor på aktuellt vägavsnitt per år
Y = andelen singelolyckor av antalet singel- och kollisionsolyckor på aktuellt vägavsnitt
X = andelen farligtgodstransporter av samtliga fordon

För att ta hänsyn till att inte alla olyckor med transport av farligt gods leder till utsläpp av det transporterade godset används ett index eller en skattad sannolikhet för att en olycka med farligt gods leder till utsläpp. Detta index för farligtgodsolycka varierar mellan 0,01 och 0,42 beroende på andelen singelolyckor för bebyggelse, hastighetsgränsen och vägtyp[103]. Andelen olyckor med farligt gods som leder till utsläpp påverkas också av tjockleken hos förvaringskärlet i vilken det farliga godset transporteras. Olika olyckor kan leda till att olika mängd farligt gods släpps ut och för att beakta detta tas även en skattad sannolikhet för litet, medelstort och stort utsläpp med i beräkningarna (se Tabell 4).

Tabell 4. Sannolikhet för olika utsläppsstorlekar vid vägstransporter (Räddningsverket, 1996, s. 29).

Transporttyp	*Litet utsläpp (a)*	*Medelstort utsläpp (b)*	*Stort utsläpp (c)*
Transport med släp, tunnväggig	0,25	0,25	0,5
Transport med släp, tjockväggig	0,075	0,075	0,15
Transport utan släp, tunnväggig	0,5	0,25	0,25
Transport utan släp, tjockväggig	0,15	0,075	0,075

Genom att multiplicera det förväntade antalet olyckor vid transport av farligt gods med indexet och sannolikheten för utsläpp erhålls för varje delsträcka ett värde på det förväntade antalet olyckor med litet, medelstort respektive stort utsläpp. Dessa tre värden förs vidare till konsekvensanalysen.

[102] Räddningsverket, 1996
[103] Räddningsverket, 1996, s. 26

6.1.3 Uppskattning av förväntat antal farligtgodsolyckor vid transport på järnväg med utsläpp

För att kunna uppskatta det förväntade antalet farligtgodsolyckor på järnväg görs dels beräkningar av olycksfrekvensen och dels skattningar av hur många av dessa olyckor som leder till utsläpp av det transporterade godset.

Beräkningen inleds med att den aktuella transportsträckan delas in i delsträckor. För att kunna beräkna olycksfrekvensen behövs en mängd information om samtliga delsträckor. De indata i metoden som krävs återfinns i Tabell 5. För beskrivning av de olika parametrarna hänvisas till SRV:s handbok.

Tabell 5. Indata för uppskattning av det förväntade antalet farligtgodsolyckor vid transport på järnväg (Räddningsverket, 1996, s.18).

Nummer	*Beskrivning*	*Beteckning*	*Storhet*
1	Avsnittets längd	S	km
2	Tågens medelstorlek uttryckt i antal vagnaxlar (fagovagnar)	TAF	st
3	Tågens medelstorlek uttryckt i antal vagnaxlar (alla vagnar)	TAV	st
4	Spårkvalitet (A, B, C, D)	(i)	
5	Rörelsens art (tåg, växling, rangering)		
6	Urspårningstal, boggievagnar	UTif	Antal urspårningar/vagnaxelkm
7	Urspårningstal, normalgodsvagnar	UTig	
8	Urspårningstal, ej spårfel, boggievagnar	UTOf	
9	Urspårningstal, ej spårfel, normalgodsvagnar	UTOg	
10	Förväntat antal kollisioner tåg-tåg/vut, per tågkm	FKT	st
11	Förväntat antal kollisioner med tungt vägfordon, per plankorsning (skyddstyp i=1-3)	FKV(i)	st
12	Antal plankorsningar med bommar	PK1	st
13	Antal plankorsningar med ljus och ljud	PK2	st
14	Antal plankorsningar utan skydd	PK3	st
15	Antal tåg med farligt gods per år	AT	st

För att beräkna det förväntade antalet farligtgodsolyckor på järnväg används olika formler beroende på tågets sammansättning och rörelsens art[104]. Innebörden i de beteckningar som används i formlerna anges i Tabell 5. För frekvens av skadade vagnar vid tåg, vagnuttagning och växlingsrörelser används i fall a) då tåget endast består av vagnar med farligt gods formlerna:

*F1 = AT * S * TAF * 2,5 * (UTif + UTOf) för urspårningar*

*F2 = AT * S * FKT * 3 för kollision tåg-tåg*

[104] Räddningsverket, 1996

*F3 = AT * 2 * (PK1 * FKV1 + PK2 * FKV2 + PK3 * FKV3)*
för kollisioner vid plankorsningar

För frekvens av skadade vagnar vid tåg, vagnuttagning och växlingsrörelser används i fall b) då tåget består av övervägande andel vagnar utan farligt gods formlerna:

*F1 = AT * S * (TAF * 2,5 * (UTif + UTOf) + (UTig + UTOg) * 2/TAV)*
(för urspårningar)

*F2 = AT * S * FKT * 3 / TAV (för kollision tåg-tåg)*

*F3 = AT * 2 * (PK1 * FKV1 + PK2 * FKV2 + PK3 * FKV3) / TAV*
(för kollisioner vid plankorsningar)

I fall c) vid rangering används formeln:

$FR = TAF * 1,2 * 10^{-6}$ *(per rangeringstillfälle)*

Då inte alla olyckor leder till utsläpp av det transporterade godset skattas sannolikheten för att en olycka ska få skadeföljder. Sannolikheten för utsläpp finns skattat för två typer av förvaringskärl; tunnväggiga och tjockväggiga. För varje typ av förvaringskärl finns sannolikhetsvärden för litet, medelstort och stort utsläpp (se Tabell 6).

Tabell 6. Sannolikhet för olika utsläppsstorlekar vid järnvägstransporter (Räddningsverket, 1996, s. 19).

Typ av tank	*Rörelsens art*	*Litet utsläpp (a)*	*Medelstort utsläpp (b)*	*Stort utsläpp (c)*
Tunnväggig	Tåg och fordonsfärd	0,25	0,04	0,01
Tunnväggig	Växling	0,25	0,02	0,01
Tunnväggig	Rangering	0,1	0,01	0,01
Tjockväggig	Tåg och fordonsfärd	0,01	0,01	0,01
Tjockväggig	Växling	0,01	0,01	0,01
Tjockväggig	Rangering	0,01	0,01	0,01

Not: För att markera att sannolikheten för utsläpp aldrig kan vara noll har mycket låga sannolikheter betecknats med 0,01 istället för med 0.

För att beräkna olycksfrekvensen för transport av farligt gods på järnväg adderas F1-3 i fall a) och b). Dessa värden, respektive FR i fall c), multipliceras med sannolikheten för utsläpp enligt Tabell 6 för att erhålla det förväntade antalet farligtgodsolyckor på järnväg.

Genom att multiplicera olycksfrekvensen med sannolikheten för utsläpp erhålls för varje delsträcka ett värde på det förväntade antalet olyckor med litet, medelstort respektive stort utsläpp. Dessa tre värden förs vidare till konsekvensanalysen.

6.1.4 Konsekvensuppskattning av farligtgodsolyckor vid transport på väg och järnväg

För de olyckor med transport av farligt gods som leder till utsläpp av det transporterade godset görs en konsekvensanalys för att uppskatta de konsekvenser på människan, egendom och miljön som uppstår. I SRV:s handbok har betydande förenklingar beträffande

konsekvensanalysen gjorts[105]. Det farliga godset har delats upp i sex ämneskategorier; giftig kondenserad gas, brandfarlig kondenserad gas, mycket brandfarlig vätska, brandfarlig vätska, giftigt ämne och starkt frätande vätska. För var och en av kategorierna har ett ämne valts att representera hela gruppen. De indata som ska anges för skattning av konsekvenser för människor är ämneskategori, transportslag (järnvägsvagn eller tankbil med eller utan släp) och befolkningstyp (stad, by eller land). Därefter går man in i en tabell och utläser antalet döda, svårt skadade och lätt skadade. Dessvärre redovisas ej hur tabellen är konstruerad.

6.2 Analys av förhållandet mellan in- och utdata för väg

6.2.1 Variation av indata

Indata i metoden varieras för att undersöka respektive parameters inverkan på olycksfrekvensen och därmed ta reda på vilka parametrar som påverkar resultatet mest. Dessutom görs en enkel osäkerhetsanalys för att visa hur den totala osäkerheten fördelas på de olika ingående parametrarna. Mot bakgrund av detta görs en bedömning beträffande metodens lämplighet för risk- och sårbarhetsanalys.

För att undersöka varje parameters inverkan på resultatet har en uppsättning ursprungsvärden använts och därefter har varje parameter varierats med ett maximalt och ett minimalt värde. Respektive parameters variation redovisas i Tabell 7 tillsammans med ursprungsvärdena. Samtliga värden har valts dels utifrån vad som anges i metoden[106] och dels mot bakgrund av vad som anses vara rimligt. Bedömningen av vad som anses rimligt i detta fall bygger på granskade riskanalyser och egna erfarenheter. Syftet med analysen är inte att bedöma riskerna i ett verkligt fall utan att bedöma hur variationer i indata påverkar resultatet. Detta gör att de enskilda värdena på parametrarna inte är intressanta i analysen.

Tabell 7. Indata i analys av varje parameters inverkan på resultatet.

	Ursprungsvärde	*Min.värde*	*Max.värde*
O	11	2	20
Y	0.24	0.05	0.5
X	0.02	0.01	0.1
Index för farligtgodsolyckor	0.11	0.01	0.42

För att undersöka hur stor betydelse parametrarna har för frekvensen av olyckor med utsläpp av farligt gods i förhållande till varandra genomförs en känslighetsanalys med hjälp av datorprogrammet @RISK (se Bilaga 1). Som indata i modellens formler för beräkning av olycksfrekvensen används ursprungsvärdena i Tabell 7. För att erhålla frekvenserna för olycka med utsläpp multipliceras formeln med sannolikheten för olika hålstorlekar för tunnväggig respektive tjockväggig tank samt för transporter med eller utan släp.

Med hjälp av datorprogrammet @RISK:s regressionsfunktion tas så kallade tornadografer fram för de olika kombinationerna. Dessa grafer visar respektive parameters korrelation med resultatet, det vill säga hur stor del av den totala osäkerheten i resultatet som härrör från respektive parameter (se Bilaga 1).

[105] Räddningsverket, 1996
[106] Räddningsverket, 1996

6.2.2 Resultat och diskussion

Resultatet av variationer av indata och dess påverkan på resultatet av det förväntade antalet farligtgodstransporter i trafikolyckor per år ($= Index\ för\ farligtgodsolycka\ (I) * (O * ((Y * X) + (1 - Y) * (2 * X - X^2)))$) redovisas tillsammans med parametrarnas ursprungsvärden och variationsbredd i Tabell 8. Genom att dividera resultatet av det maximala parametervärdet med resultatet av det minimala parametervärdet erhålls en faktor som visar omfattningen av resultatens variation. Även denna variationsfaktor anges i Tabell 8. Av formeln följer att resultatet är linjärt beroende av O och I. Trots detta redovisas även dessa parametrars variationsfaktorer i Tabell 8.

Tabell 8. Indata och resultat av analys av varje parameters inverkan på resultatet.

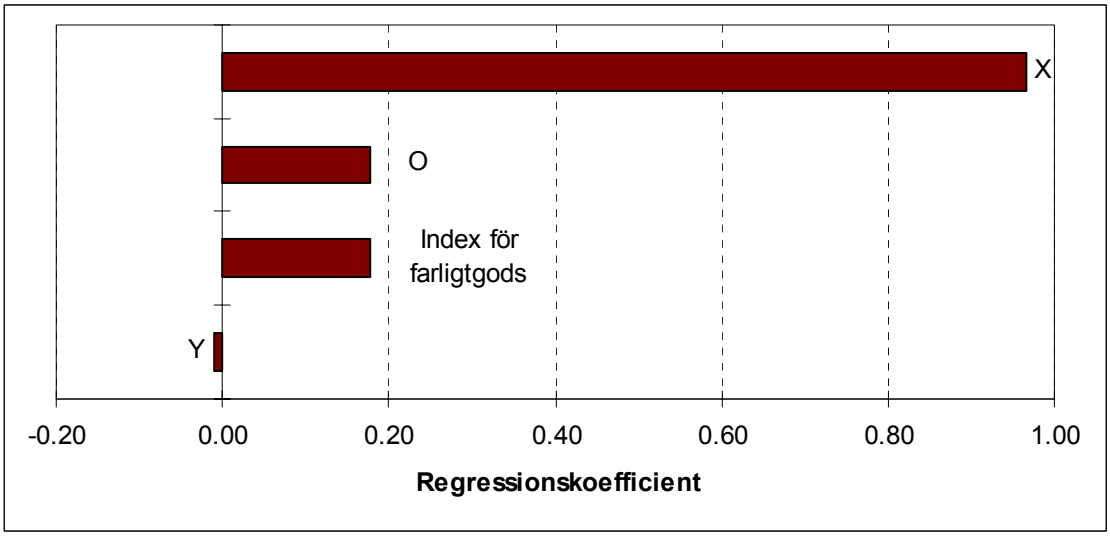
	Ursprungsvärde	*Min.värde*	*Max.värde*	*Min. resultat*	*Max. resultat*	*Variations faktor*
O	11	2	20	7.68E-3	7.68E-2	10.0
Y	0.24	0.05	0.5	4.67 E-2	3.61E-2	0.771
X	0.02	0.01	0.1	2.12 E-2	0.204	9.61
I	0.11	0.01	0.42	3.84E-3	0.161	42.00

Resultatet från analysen av varje parameters inverkan på frekvensen för olycka ger variation med en faktor 10 för O och X ger en variationsfaktor på ca 10. Variation av index för farligtgodsolyckor med en faktor 42 ger en variationsfaktor på 42. Detta innebär att resultatet förändras i takt med att värdena för O, X och index för farligtgodsolyckor varierar. Parametern Y påverkar inte resultatet nämnvärt trots en relativt stor variation. I takt med att värdet på Y förändras i storleksordningen en faktor 10 varierar resultatet med en faktor på knappt ett. Slutsatsen blir således att antalet trafikolyckor (O), andelen farligtgodstransporter (X) samt index för farligtgodsolyckor är de mest betydelsefulla parametrarna vid beräkning av frekvens för olycka vid transport av farligt gods. Genom att multiplicera det förväntade antalet farligtgodsolyckor med sannolikheten för respektive hålstorlek erhålls olycksfrekvensen för utsläpp. Därför spelar sannolikheten för hålstorlek stor roll vid beräkning av frekvensen för olycka med utsläpp.

Resultatet är inte överraskande då formeln bygger på att relatera förekomsten av olyckor till andelen trafik som utgörs av farligt gods. Indexet för farligtgodsolyckor bygger på en matris för farligtgodslyckor efter bebyggelse, hastighetsgräns och vägtyp[107]. Indexet påverkar resultatet i relativt stor omfattning och med anledning av det är det anmärkningsvärt att kopplingen mellan matrisens olika delar inte tydligt redovisas. Att hålstorleken spelar en avgörande roll för olycksfrekvensen för utsläpp är föga överraskande då denna parameter utgör en stor del av beräkningsformeln. Med anledning av detta faktum är förenklingen att skadeutfallet endast finns i tre klasser (litet, mellan och stort) alltför grov för att ge ett tillfredsställande resultat på olycksfrekvensen för farligtgodsolycka med utsläpp. Inte heller att antalet trafikolyckor (O) och andelen farligtgodstransporter (X) har relativt stor inverkan på resultatet är överraskande. Dock kan konstateras att den formel som används för beräkning av olycksfrekvensen ej är tillräckligt väl underbyggd och dess utseende motiveras ej tillfredsställande varken i handboken[108] eller i den bakomliggande rapporten[109].

[107] Räddningsverket, 1996, s.26
[108] Räddningsverket, 1996
[109] Nilsson, G., 1994

Osäkerhetsanalysen visar att andelen farligtgodstransporter innehåller en stor del av den totala osäkerheten i resultatet (se Figur 11). En hög regressionskoefficient för en parameter innebär att parametern bidrar i hög grad till resultatets totala osäkerhet. Låg regressionskoefficient visar följaktligen att parametern inte bidrar nämnvärt till den totala osäkerheten[110].



Figur 11. Regressionskoefficient för farligtgodtransport på väg.

Datorprogrammet @RISK anger inte explicit vilka matematiska uttryck regressionsfunktionen bygger på. Funktionen antas dock bygga på Taylorutveckling och Gaussapproximation där varje stapel i diagrammet motsvarar parameterns partiella derivata i formel 2 nedan (se även avsnitt 3.3.2).

$$Var[y] \approx \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_1} \right]^2_{X^0} Var[x_1] \right) + \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_2} \right]^2_{X_0} Var[x_2] \right) \qquad 2$$

Om värdet på varje stapel kvadreras och multipliceras med variansen erhålls delvariansen för respektive parameter. Resultatet är snarlikt för samtliga möjliga kombinationer (se Bilaga 1).

6.3 Analys av förhållandet mellan in- och utdata för järnväg

6.3.1 Variation av indata

Indata i metoden varieras för att undersöka respektive parameters inverkan på olycksfrekvensen och därmed ta reda på vilka parametrar som påverkar resultatet mest. Dessutom görs en enkel osäkerhetsanalys för att visa hur den totala osäkerheten fördelas på de olika ingående parametrarna. Mot bakgrund av känslighetsanalysen och osäkerhetsanalysen görs en bedömning beträffande metodens lämplighet för risk- och sårbarhetsanalys. För att minska antalet beräkningar vid variation av indata genomförs beräkningar endast för fall b) då tåget består av övervägande andel vagnar utan farligt gods och c) vid rangering. Samtliga parametrar för fall a) då tåget endast består av vagnar med farligt gods ingår i formlerna för fall b) vilket gör att själva analysen av metoden inte påverkas. Dessutom anses fall med endast farligtgodsvagnar vara relativt ovanliga.

[110] Palisade Corporation, 1994

För att undersöka varje parameters inverkan på förväntad frekvens av olycka med farligt gods (F1+F2+F3 respektive FR) används en uppsättning ursprungsvärden och därefter varieras varje parameter var för sig med ett maximalt och ett minimalt värde. Ursprungsvärdena och respektive parameters variation redovisas i inte är intressant i analysen.

Tabell 9. De parametrar vars värde är konstant och anges i handboken varieras inte (FKV(1-3) = $5*10^{-8}$, $15*10^{-8}$, $2*10^{-8}$; UTOf = $4*10^{-9}$; UTOg = $8,7*10^{-9}$). Samtliga värden väljs dels utifrån vad som anges i metoden[111] och dels mot bakgrund av vad som anses vara rimligt. Syftet med analysen är inte att bedöma riskerna i ett verkligt fall utan att bedöma hur variationer i indata påverkar resultatet. Detta gör att de enskilda värdena på parametrarna inte är intressant i analysen.

Tabell 9. Indata vid analys av varje parameters inverkan på resultatet för tåg, fordonsfärd, växling och rangering (*spårkvalitet B; **spårkvalitet A; ***spårkvalitet D).

	Ursprungsvärde	*Min.värde*	*Max.värde*
S	2	0.5	5
TAF	20	4	40
TAV	75	30	150
UTif(i)	1.90E-09*	8.00E-10**	7.30E-09***
Utig(i)	4.30E-09*	1.80E-09**	1.67E-08***
PK1	1	0	2
PK2	1	0	2
PK3	1	0	2
AT	2200	400	4000

För att undersöka hur stor andel av den totala osäkerheten som kan tillskrivas de enskilda parametrarna genomförs en osäkerhetsanalys med hjälp av datorprogrammet @RISK (se Bilaga 1). Som indata i modellens formler för beräkning av olycksfrekvensen (F1, F2, F3 respektive FR) används ursprungsvärdena i inte är intressant i analysen.

Tabell 9. För att erhålla frekvenserna för olycka med utsläpp adderas formlerna F1, F2 och F3 respektive FR för de olika spårkvaliteterna (A, B, C, D).

Med hjälp av datorprogrammet @RISK:s regressionsfunktion tas så kallade tornadografer fram för de olika kombinationerna. Dessa grafer visar respektive parameters korrelation med resultatet, det vill säga hur stor del av den totala osäkerheten i resultatet som härrör från respektive parameter (se Bilaga 1).

6.3.2 Resultat och diskussion

Resultatet av variationer av indata och dess påverkan på resultatet av formlerna F1, F2, F3 och FR redovisas tillsammans med parametrarnas ursprungsvärden och variationsbredd i Tabell 10 och Tabell 11. Genom att dividera resultatet av det maximala parametervärdet med resultatet av det minimala parametervärdet erhålls en faktor som visar omfattningen av resultatens variation. Även denna variationsfaktor anges i Tabell 10 och Tabell 11.

[111] Räddningsverket, 1996

Tabell 10. Indata och resultat av analys av varje parameters inverkan på resultatet för tåg, fordonsfärd och växling (*spårkvalitet B; **spårkvalitet A; ***spårkvalitet D).

	Ursprungs-värde	*Min.värde*	*Max.värde*	*Min.resultat (F1+F2+F3)*	*Max.resultat (F1+F2+F3)*	*Variationsfaktor*
S	2	0.5	5	3.40E-4	3.29 E-3	9.66
TAF	20	4	40	2.84E-4	2.62 E-3	9.21
TAV	75	30	150	1.36E-3	1.31 E-3	0.963
UTif(i)	1.90E-9*	8.00E-10**	7.30E-9***	1.08E-4	2.51 E-3	2.32
UTig(i)	4.30E-9*	1.80E-9**	1.67E-8***	1.08E-3	2.51 E-3	2.32
PK1	1	0	2	1.32E-3	1.32 E-3	1.00
PK2	1	0	2	1.31E-3	1.33 E-3	1.01
PK3	1	0	2	1.32E-3	1.32 E-3	1.00
AT	2200	400	4000	2.41E-4	2.41 E-3	10.0

Tabell 11. Indata och resultat av analys av varje parameters inverkan på resultatet för rangering.

	Ursprungs-värde	*Min.värde*	*Max.värde*	*Min.resultat (FR)*	*Max.resultat (FR)*	*Variationsfaktor*
TAF	20	4	40	4.8E-6	4.8E-5	10

Resultatet från analysen av varje parameters inverkan på frekvensen för olycka ger att en variation med en faktor 10 för S, TAF och AT ger en variationsfaktor på ca 10 vilket innebär att resultatet förändras i takt med att värdena för S, TAF och AT varierar. Parametrarna TAV och antalet plankorsningar (PK1, PK2, PK3) påverkar inte resultatet nämnvärt trots en relativt stor variation. I takt med att värdena på urspårningstalen (UTif och UTig), som beror på järnvägsrälsens spårkvalitet (A, B, C, D), förändras i storleksordningen en faktor 10 varierar resultatet med en faktor på drygt 2. Slutsatsen blir således att det analyserade avsnittets längd (S), antalet farligtgodsvagnar (TAF) och antalet tåg med farligt gods (AT) är de mest betydelsefulla parametrarna vid beräkning av frekvens för olycka vid transport av farligt gods. Även spårkvaliteten, via urspårningstalen, inverkar till viss del på resultatet medan antalet vagnar utan farligt gods samt antalet plankorsningar inte har någon nämnvärd betydelse för beräkningen av olycksfrekvensen.

Att antalet farligtgodsvagnar per tåg (TAF) och det totala antalet transporter av farligt gods (AT) spelar stor roll vid beräkning av olycksfrekvensen är naturligt då frekvensen för olycka vid transport av farligt gods bör öka i takt med att mängden transporter av farligt gods ökar. Likaså är den analyserade sträckans (S) betydelse för resultatet väntad då en längre sträcka medför en ökad risk för olycka. Dock bör det faktum att inga egentliga begränsningar avseende sträckans längd finns för användningen av metoden beaktas. Ju längre sträcka desto större osäkerheter ligger i antagandet att riskbilden kring hela sträckan är homogen. Att inte spårkvaliteten, via urspårningstalen, medför större inverkan på resultatet kan förklaras med att skillnaderna mellan olika spårkvaliteter är relativt små. Att inte antalet godsvagnar (TAV) spelar stor roll för olycksfrekvensen är inte så märkligt då antalet vagnar inte påverkar olycksfrekvenser vid kollisioner tåg-tåg, eller kollision vid plankorsningar utan endast vid urspårningar. Märkligt är dock att det totala antalet vagnar är en del av formlerna för respektive term till den totala olycksfrekvensen (F1+F2+F3).

Då frekvensen för olycka multipliceras med sannolikheten för olika hålstorlekar påverkar värdena på dessa sannolikheter resultatet avsevärt. Detta gäller för såväl tåg/fordonsfärd som

växling och rangering. Med anledning av detta faktum är förenklingen att skadeutfallet endast finns i tre klasser (litet, mellan och stort) alltför grov för att ge ett tillfredsställande resultat på olycksfrekvensen för farligtgodsolycka med utsläpp. Vidare ifrågasätt den förenkling som gjorts i modellen[112] att mycket låga sannolikheter betecknas med 0,01 istället för 0. Detta tal är alltför stort för att beteckna mycket låga sannolikheter mot bakgrund av hålstorlekens betydelse för slutresultatet.

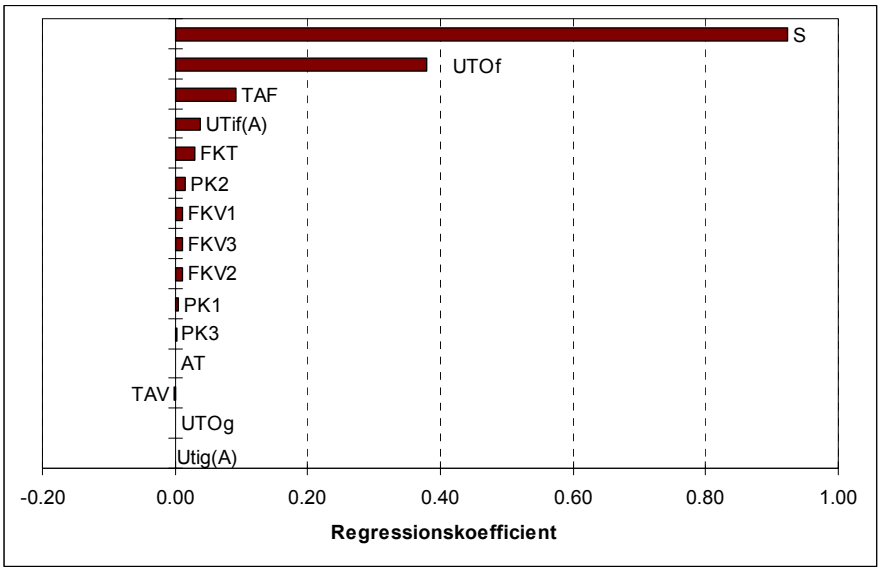
Anmärkningsvärt är att antalet plankorsningar inte spelar så stor roll för resultatet. Detta går emot den gängse uppfattningen att plankorsningar utgör en stor fara för säkerheten på och kring järnvägen och därför bör undvikas. På Banverkets hemsida står följande att läsa om säkerheten på spåranläggningarna[113]:

> Korsningar mellan väg och järnväg i samma plan kallas plankorsningar. Banverket gör idag stora insatser för att ta bort dessa plankorsningar eller öka säkerheten vid dem… Av olycksstatistiken framgår att arbetet med att ta bort plankorsningar eller förse dem med vägskydd har gett resultat. Antal olyckor och antalet döda och skadade har halverats sedan mitten på 1980-talet.

Att inte plankorsningarna utgör en betydelsefull parameter vid beräkning av olycksfrekvensen vid transport av farligt gods tolkas som en inteckning för att beräkningsmetoden är mindre lämplig som riskanalysmetod. Det kan
konstateras att de formler som används för beräkning av olycksfrekvensen ej är tillräckligt väl underbyggda och deras utseende motiveras ej tillfredställande varken i handboken[114] eller i den bakomliggande rapporten[115].

Osäkerhetsanalysen visar att parametern S (det analyserade avsnittets längd) innehåller den största delen av den totala osäkerheten tillsammans med UTOf (urspåringstalet för farligtgodsvagnar) (se Figur 12). En hög regressionskoefficient för en parameter innebär att parametern bidrar i hög grad till den totala osäkerheten i resultatet. Låg regressionskoefficient visar följaktligen att parametern inte bidrar nämnvärt till den totala osäkerheten[116].

[112] Räddningsverket, 1996, s. 19
[113] Banverkets hemsida, 2002
[114] Räddningsverket, 1996
[115] Fredén, S., 1994
[116] Palisade Corporation, 1994



Figur 12. Regressionskoefficienter för spårkvalitet A.

Datorprogrammet @RISK anger inte explicit vilka matematiska uttryck regressionsfunktionen bygger på. Funktionen antas dock bygga på Taylorutveckling och Gaussapproximation där varje stapel i diagrammet motsvarar parameterns partiella derivata i formel 2 nedan (se även avsnitt 3.3.2).

$$Var[y] \approx \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_1} \right]^2_{X^0} Var[x_1] \right) + \left(\left[\frac{\partial y}{\partial x_2} \right]^2_{X_0} Var[x_2] \right) \qquad 2$$

Om värdet på varje stapel kvadreras och multipliceras med variansen erhålls delvariansen för respektive parameter. Resultatet är snarlikt för samtliga möjliga kombinationer (se Bilaga 1).

6.4 Analys av förhållandet mellan in- och utdata för konsekvensuppskattning

De förenklingar som gjorts i SRV:S handbok av hur konsekvenserna av en farligtgodsolycka kan uppskattas är betydande. De enda indata som krävs för skattning av konsekvenserna för människor är ämneskategori, transportslag (järnvägsvagn eller tankbil med eller utan släp) och befolkningstyp (stad, by eller land). Då de olika parametrarna endast medger en grov uppskattning av konsekvenserna genomförs ingen djupare analys av hur varje enskild parameter påverkar resultatet. Syftet med riskanalysmetoden är att jämföra risknivån för transporter på väg och järnväg. Då samma förenklingar beträffande konsekvensberäkningen används för respektive transportslag är osäkerheterna i indata inte lika viktiga som vid konsekvensberäkningar i det enskilda fallet. För en allmän diskussion kring olika variablers betydelse för resultatet i konsekvensuppskattningar hänvisas till avsnitt 7.

6.5 Slutsats och diskussion kring VTI-metodens lämplighet

Vid beräkning av olycksfrekvens för utsläpp vid transport av farligt gods på väg är antalet trafikolyckor, andelen farligtgodstranporter, index för farligtgodsolyckor samt sannolikheten för olika hålstorlekar de mest betydelsefulla parametrarna. För motsvarande beräkningar för järnväg är antalet farligtgodsvagnar, det totala antalet transporter av farligt gods, den analyserade sträckans längd samt sannolikheten för olika hålstorlekar de mest betydelsefulla parametrarna. Det innebär att för att metoden överhuvudtaget ska kunna ge ett användbart resultat krävs ett pålitligt statistiskt underlag för dessa parametrar. Om indata av

tillfredsställande kvalitet inte finns att tillgå är metoden ej lämplig för att analysera riskerna förknippade med transport av farligt gods på väg och järnväg.

Metodens vara eller inte vara trots eventuellt tillfredsställande statistikunderlag kan ifrågasättas mot bakgrund av följande:

- Indexet för farligtgodsolyckor på väg bygger på en matris för farligtgodslyckor efter bebyggelse, hastighetsgräns och vägtyp[117]. Mot bakgrund av att indexet påverkar resultatet i relativt stor omfattning är det anmärkningsvärt att kopplingen mellan matrisens olika delar inte tydligt redovisas och att metodens transparens ej är tillfredsställande.

- Formlerna för beräkning av olycksfrekvensen, både för väg och järnväg, är ej tillräckligt väl underbyggd och dess utseende motiveras ej tillfredsställande varken i handboken[118] eller i den bakomliggande rapporten[119].

- Hålstorleken spelar en avgörande roll för olycksfrekvensen för utsläpp. Med anledning av detta faktum är förenklingen att skadeutfallet endast finns i tre klasser (litet, mellan och stort) alltför grov för att ge ett tillfredsställande resultat. Vidare utgör de sannolikheter som redovisas endast ett räkneexempel på grund av bristfälligt statistikunderlag[120] och därför är de ej lämpliga att använd för beräkning av risk.

- Urspåringstalet för farligtgodsvagnar (UTOf) medför betydande påverkan på resultatet. Detta värde finns angivet i modellen och parametern är därmed inte beroende av statistik för det enskilda fallet. Vikten av att detta värde är rimligt och ger en tillfredsställande beskrivning av verkligheten är således betydande, varför det är allvarligt att information om kvaliteten på detta parametervärde saknas.

- Att inte plankorsningarna utgör en betydelsefull parameter vid beräkning av olycksfrekvensen vid transport av farligt gods på järnväg tolkas som en inteckning för att beräkningsmetoden är mindre lämplig som riskanalysmetod.

- Den förenkling som gjorts i modellen för järnväg att mycket låga sannolikheter betecknas med 0,01 istället för 0 ifrågasätts. Detta tal är alltför stort för att beteckna mycket låga sannolikheter mot bakgrund av känslighetsanalysen.

Metoden är avsedd att användas vid jämförelser mellan riskerna förknippade med väg och järnväg. För att en metod ska vara användbar för detta ändamål krävs att osäkerheterna är desamma för väg respektive järnväg så att de mer eller mindre kan bortses ifrån. Så är inte fallet med VTI-metoden. Som metod för risk- och sårbarhetsanalys beträffande transport av farligt gods på väg och järnväg anses inte VTI-metoden ge ett tillräckligt bra underlag för beslut och därmed bör metoden inte användas. Antingen måste metoden förbättras, alternativa metoder användas eller måste nya metoder utvecklas. Det är anmärkningsvärt att metoden används så mycket som den gör med tanke på de stora brister som ovanstående analys påpekat. Det finns planer på att införliva datormodellen FarGo i Räddningsverkets

[117] Räddningsverket, 1996, s.26
[118] Räddningsverket, 1996
[119] Nilsson, G., 1994
[120] Nilsson, G., 1994, s. 32

Informationsbank[121] vilket kan leda till att metoden blir en inofficiell svensk standard för riskanalys av farligt godstransporter. Detta är en oroande utveckling.

[121] Postgård, U., 2002

7 QRA - Quantitative Risk Analysis

7.1 Metodbeskrivning

7.1.1 Bakgrund och syfte

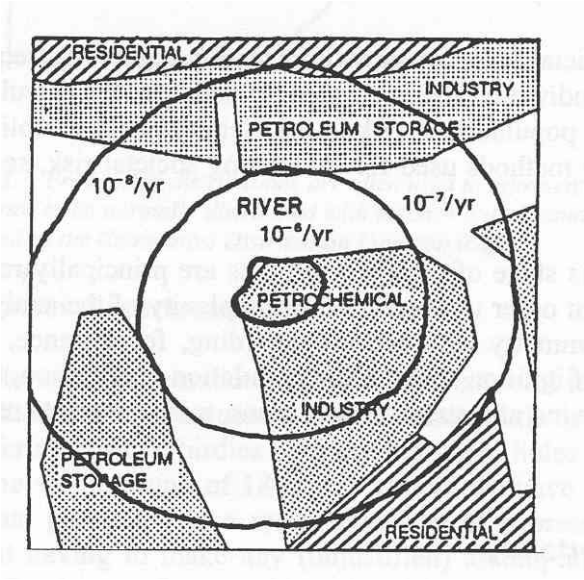
Quantitative Risk Analysis (QRA) utgör ett systematiskt tillvägagångssätt där ett stort antal modeller för identifiering och beräkning av risk används. QRA är en omfattande analys som består av fyra delar; identifiering av risk, beräkning av frekvenser och sannolikheter, beräkning av konsekvenser där en eller flera metoder kan användas för respektive del samt värdering av risken. Användningen av QRA för att analysera risker har ökat på senare tid till följd av att lagstiftningen och myndighetskraven på många områden har skärpts. QRA syftar till att genom konsekvens- och frekvensberäkningar erhålla ett absolut mått på hur stor risk ett system utgör för människor, miljö och egendom i systemets omgivning.

7.1.2 Arbetsgång

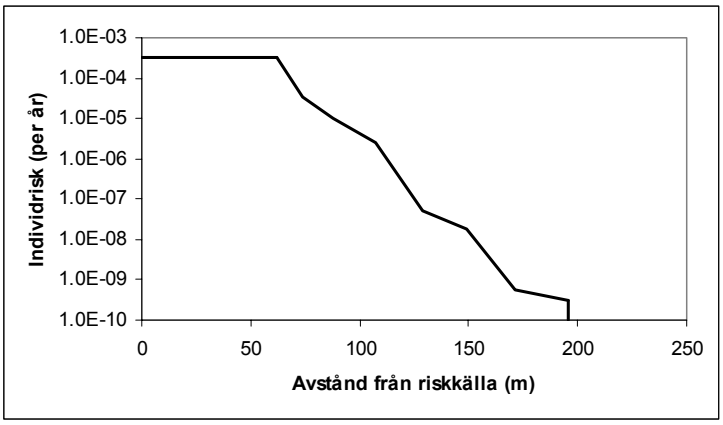
QRA bygger på att de risker som identifierats kvantifieras med avseende på både sannolikheter/frekvenser och konsekvenser. Potentiella olycksscenarier identifieras med hjälp av kvalitativa analyser som grovanalys, HAZOP m.fl., och de scenarier som ska analyseras vidare definieras. Oftast används scenarier med utsläpp av giftiga ämnen eller explosioner. Frekvensen för utvalda scenarier beräknas sedan. Det finns flera olika teoretiska metoder för att ta fram frekvenserna. Frekvenserna kan t.ex. beräknas med hjälp av felträds- och händelseträdsanalys eller historiska data. Därefter beräknas konsekvenserna för valda olycksscenarier. För konsekvensberäkningarna används vanligen spridnings- och/eller strålningsberäkningar. Vanligtvis beaktas konsekvenser i form av giftdos, strålningsnivå och trycknivå. Det finns idag ett stort antal datorprogram och modeller för dessa beräkningar. För att kunna bedöma hur konsekvenserna kommer att påverka människa, miljö och/eller egendom måste skadekriterier tydligt definieras. Med skadekriterier avses den beräkningstekniska parameter som anger gränsen för vilka skador som beaktas för varje konsekvensanalys. Exempel på skadekriterier är Lethal Concentration (LC), Immediately Dangerous to Life and Health (IDLH) och Lethal Dose (LD).

Den totala risken som systemet utgör kan beräknas om samtliga analyserade scenariers frekvens respektive konsekvens adderas. För att erhålla ett absolut mått på hur stor risk ett system utgör för människor, miljö och egendom i anläggningens omgivning vägs frekvenserna och konsekvenserna samman. I QRA skiljer man på två olika typer av riskmått: individ- och samhällsrisk. Med individrisk avses sannolikheten att enskilda individer ska omkomma eller skadas inom eller i närheten av ett system. Samhällsrisken eller den kollektiva risken avser risken för att en grupp människor inom ett visst område ska omkomma eller skadas. Skillnaden mellan individ- och samhällsrisk är att individrisken är oberoende av hur många människor som vistas i området, medan samhällsrisken är direkt beroende av hur många människor som befinner sig i området. Båda måtten baseras på frekvens- och konsekvensberäkningar men innehåller i övrigt inga likheter och ska därför inte jämföras med varandra.

Individrisken kan redovisas i form av så kallade riskkonturer (se Figur 13) som visar den förväntade frekvensen för en händelse som orsakar en viss nivå av skada i ett specifikt område eller i form av individriskprofil (se Figur 14) som visar individrisken som funktion av avståndet från riskkällan.

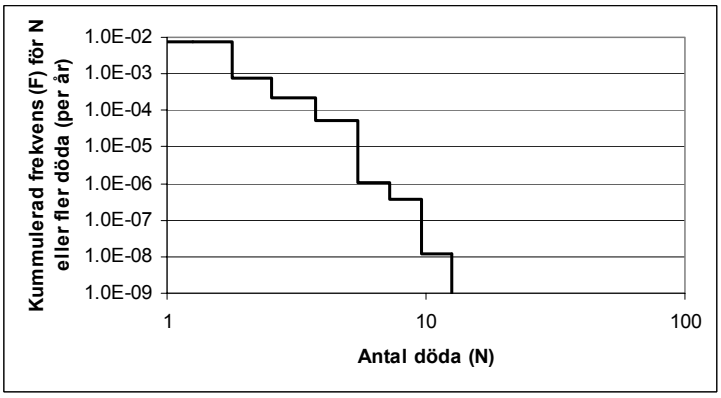


Figur 13. Exempel på individriskkonturer (från Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000).



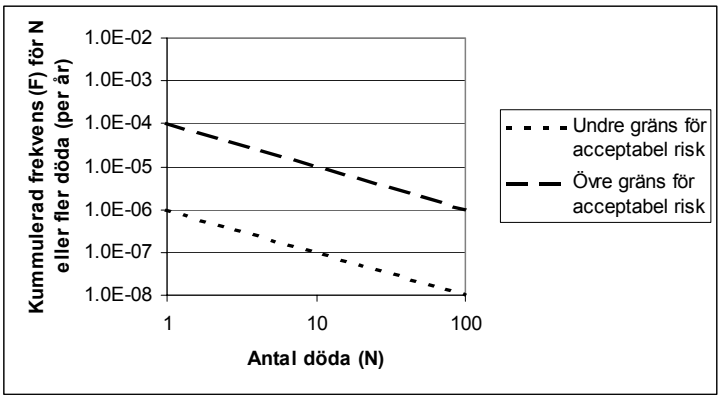
Figur 14. Exempel på individriskprofil.

Samhällsrisken redovisas ofta med en F/N-kurva som visar den ackumulerade frekvensen för ett visst utfall, t.ex. antal döda p.g.a. en eller flera olyckor (se Figur 15).



Figur 15. Exempel på F/N-kurva.

Det sista steget i en QRA är att värdera risken. För att värdera riskerna används ofta kriterier för vad som anses vara acceptabel risk (se Figur 16). Utan kriterier för värdering av risk kan värdet av riskanalysen urholkas då riskmåtten i sig inte ger tillräckligt mycket information för att utgöra ett bra beslutsunderlag. I Sverige finns idag inga fastställda kriterier för värdering av risk. Dock har olika kriterier tagits fram på lokal nivå, exempelvis i Malmö[122] och Stockholm[123].



Figur 16. Exempel på kriterier för värdering av risk.

Dessa kriterier motsvarar de kriterier som Räddningsverket tagit fram som underlag till fortsatt diskussion och utredning kring riskkriterier[124]. Utomlands finns det flera olika typer av kriterier för värdering av risk, både för nybyggnation av industrier och för transport av farligt gods[125,126].

7.1.3 Beräkning av det förväntade värdet på individrisken

För beräkning av frekvenser/sannolikheter för respektive scenario används felträds- och Händelseträdsanalys. Analys av förhållandet av in- och utdata för dessa analysmetoder har gjorts i kapitel 4 och 5. Konsekvenserna beräknas med hjälp av spridningsmodeller. Spridningsmodellerna i sig analyseras inte beträffande förhållandet mellan in- och utdata, utan används endast i analysexemplet för att erhålla koncentrationen av utsläppt ämne som funktion av avståndet till utsläppskällan.

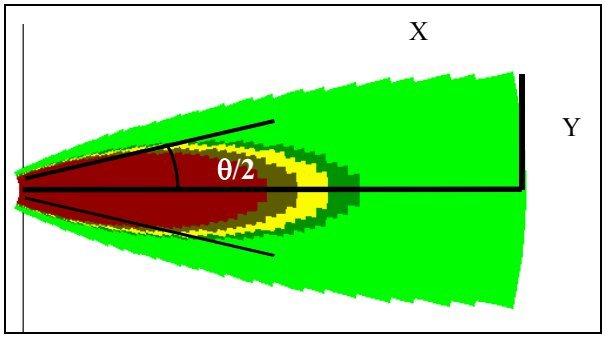
De parametrar som påverkar individrisken förutom frekvenserna/sannolikheterna och spridningsmodellen är spridningsvinkel och val av skadekriterier. Även vindpåverkan påverkar individrisken men beaktas inte i denna analys. Med skadekriterier avses den beräkningstekniska parameter som anger gränsen för vilka skador som beaktas för varje konsekvensanalys. Ofta utgörs detta skadekriterium av ämnets LC_{50}-värde, det vill säga den koncentration vid vilken hälften av de exponerade individerna förväntas avlida.

[122] Skyddsavdelningen Malmö Brandkår, 2000
[123] Stockholms Brandförsvar, 2001
[124] Räddningsverket, 1997
[125] European Commission, 1994
[126] European Commission, 1996

Spridningsvinkeln beräknas med utgångspunkt från spridningsberäkningarna[127] som

$\tan \theta/2 = Y/X$

i Figur 17.



Figur 17. Förenkling för beräkning av spridningsvinkel (θ).

Spridningsvinkeln multipliceras med frekvensen/sannolikheten för respektive scenario för att erhålla frekvensen för att en individ befinner sig i effektzonen, det vill säga det område inom vilket utsläppet/explosionen får konsekvenser, enligt[128]:

$f_{i,d} = f_i * (\theta/360)$

där $f_{i,d}$ *= frekvensen för att en individ befinner sig inom effektzonen för scenario i*

f_i *= frekvensen för scenario i*
θ *= spridningsvinkeln i grader*

Frekvenserna knyts till det avstånd för respektive scenario där koncentrationen uppnår gränsen för valt skadekriterium. Koncentration erhålls genom spridningsmodeller.

7.1.4 Beräkning av det förväntade värdet på samhällsrisken

För beräkning av frekvenser/sannolikheter för respektive scenario används felträds- och Händelseträdsanalys. Analys av förhållandet av in- och utdata för dessa analysmetoder har gjorts i kapitel 4 och 5. Vid beräkningar av frekvenser/sannolikheter för respektive scenario tas hänsyn till vindriktning, det vill säga att de olika möjliga vindriktningarnas sannolikhet finns med i felträd/händelseträd. Konsekvenserna beräknas med hjälp av spridningsmodeller där parametrar som vindhastighet och stabilitetsklass ingår. Spridningsmodellerna i sig analyseras inte beträffande förhållandet mellan in- och utdata, utan används endast i analysexemplet för att erhålla koncentrationen av utsläppt ämne som funktion av avståndet till utsläppskällan.

De parametrar som påverkar samhällsriskberäkningarna förutom frekvenser/sannolikheter och spridningsmodell är spridningsvinkel, val av skadekriterier samt befolkningstäthet. Spridningsvinkeln används för att beräkna hur stor effektzonens area är, det vill säga det

[127] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000, s. 593
[128] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000, s. 414

område som påverkas av utsläppet/explosionen. Effektzonens area beräknas därför med hjälp av formeln:

$A_{effektzon} = \pi * r^2 * \theta / 360$
θ = *spridningsvinkeln i grader*
r = avståndet (i meter) till den punkt där koncentrationen av utsläppt ämne uppfyller valt skadekriterium

Val av skadekriterium ger avståndet r i ovanstående formel vilket i sin tur påverkar effektzonens area. Vanligtvis görs förenklingen att alla individer inom effektzonen omkommer och alla individer utanför överlever. Hänsyn tas således ej till skador av olika grad.

För att beräkna hur många människor som påverkas av utsläppet/explosionen multipliceras effektzonens area med områdets befolkningstäthet. Vid uppskattning av befolkningstätheten beaktas hur många människor som kommer att exponeras för utsläppet/explosionen och i vilken omfattning. Hänsyn tas till uppehållstid i området, om människor vistas ute eller inne, tidpunkt på dygnet, m.m.

7.2 Analys av förhållandet mellan in- och utdata för individrisk

7.2.1 Variation av indata

Genom att variera indata i metoden kan kvaliteten på utdata undersökas för att avgöra om metoden är lämplig eller ej för risk- och sårbarhetsanalys.

Utöver de parametrar som påverkar frekvensen för väntat skadeutfall som tagits upp vid analys av felträd/händelseträd kan parametrarna spridningsvinkel och skadekriterium variera och därmed påverka resultatet vid individriskberäkningar. Beräkning av individrisken innehåller enligt formeln ovan enkla matematiska förhållanden i form av multiplikation. Mot bakgrund av dessa enkla matematiska förhållanden skulle en generell känslighets- och osäkerhetsanalys inte ge mer information om metodens lämplighet än en generell diskussion om hur kvaliteten på indata påverkar resultatet. Med anledning av detta görs för individriskens frekvens inga illustrerande beräkningar utan endast en generell diskussion förs för betydelsen av variationer i spridningsvinkeln. Frekvensen beräknas enligt formeln

$f_{i,d} = f_i * (\theta / 360)$

vilket gör att om spridningsvinkeln (θ) varierar med en faktor tio kommer frekvensen att göra det samma. Så stora variationer på spridningsvinkeln förekommer bara då ett värde på spridningsvinkeln antas istället för att beräknas.

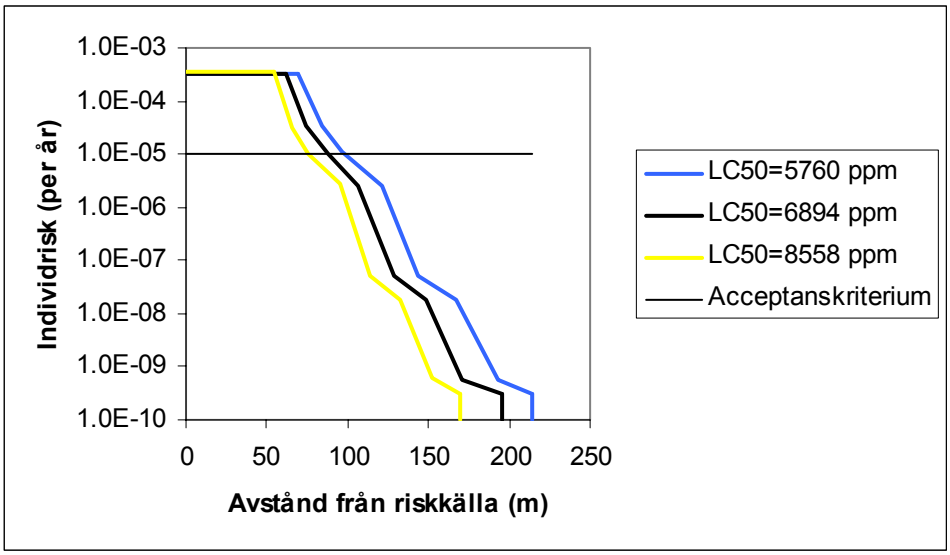
Skadekriteriet är avgörande både för spridningsvinkeln och det avstånd som knyts till respektive frekvens. Skadekriterier varierar ofta stort mellan olika typer av undersökningar eller databaser. Detta beror på att värdena, exempelvis i form av LC_{50}-värden, tagits fram på olika sätt. I en del fall har djurförsök extrapolerats att gälla även människor och i vissa sällsynta fall har försök utförda på människor legat till grund för skadekriterierna. Vidare beror värdet på skadekriterierna till stor del på hur lång exponeringstid som avses.

Vid analysen används utsläpp av ammoniak som exempel på olycksscenario. För olika skadekriterier, här i form av för ammoniak, varierar avståndet från riskkällan till den punkt

där skadekriteriet uppfylls. LC_{50}-värdet varieras mellan 8558 ppm[129], 6894 ppm[130] och 5760 ppm[131]. Avståndet erhålls genom spridningsberäkningar i datorprogrammet BFK (se Bilaga 2). Spridningsvinkeln erhålls genom handberäkningar som $\tan \theta/2 = Y/X$ i Figur 17.

7.2.2 Resultat och diskussion

Resultatet av beräkningarna av spridningsvinkeln återfinns i bilaga 3 tillsammans med övriga individriskberäkningar. Resultatet redovisas i en individriskprofil där individrisken för de olika värdena på skadekriteriet LC_{50} illustreras (se Figur 18).



Figur 18. Individriskprofil för olika LC_{50}-värden.

Utan tillgång till någonting att jämföra resultatet med är informationen som finns att hämta i diagrammet begränsad. Att utföraren av riskanalysen känner till och förstår innebörden av ovanstående riskprofil innebär inte att denna information kan spridas till och förstås av de personer som slutligen ska fatta besluten. För att ge tillräcklig information krävs att kriterier för värdering av individrisk finns.

Osäkerheter vid beräkningar av frekvensen generellt sett diskuteras i avsnitt 4.2 och 5.2. Frekvensen för respektive olycksscenario påverkas linjärt av värdet på spridningsvinkeln. Detta innebär att vid manipulation av spridningsvinkeln kan resultatet lätt påverkas och därmed medföra att acceptanskriterier underskrids. Denna form av manipulation är bara möjlig då spridningsvinkeln uppskattas istället för beräknas med hjälp av spridningsmodeller. Utöver att kvaliteten på indata i spridningsmodellen är av betydelse tillkommer själva spridningsmodellens begränsningar och felkällor. Dessa medför ytterligare osäkerheter i resultatet.

Skadekriteriet är den största inverkande faktorn då det påverkar både spridningsvinkeln och avståndet. Analysen visar att individrisken varierar med värdet på det skadekriterium som valts. I och med att resultatet kan variera för ett och samma skadekriterium bör resultatet variera ännu mer mellan olika typer av skadekriterier. Det vanliga antagandet att alla individer

[129] Dahlberg, P., Maria, D., 2001
[130] Bergfeldt, M., et al, 2002
[131] Carlsson, J., et al, 1997

inom och inga personer utanför effektzonen avlider är diskutabelt. Att anta att dödligheten är 100 % på alla avstånd inom effektzonen är ett relativt grovt antagande då dödligheten minskar med avståndet från riskkällan. Dessutom finns det stora individuella variationer i personers känslighet för utsläpp av olika ämnen. Ur beräkningssynpunkt är antagandet nödvändigt men det är viktigt att vara medveten om bristerna i antagandet och att avståndet som erhålls inte är en strikt gräns.

7.3 Analys av förhållandet mellan in- och utdata för samhällsrisk

7.3.1 Variation av indata

För att analysera hur samhällsrisken påverkas av variationer i indata görs följande analys där indata i form av skadekriterium, spridningsvinkel och befolkningstäthet varieras var för sig. Resultatet presenteras i form av redovisande F/N-diagram där de olika variationerna som ger upphov till olika kurvor åskådliggörs i samma diagram. Vid analysen används utsläpp av ammoniak som exempel på olycksscenario. Som utgångspunkt för variationerna används parametervärdena i Tabell 12.

Avståndet (r) erhålls genom spridningsberäkningar i datorprogrammet BFK (se Bilaga 2). Ett LC_{50}-värde motsvarande 6894 ppm[132] utgör ursprungsscenariot. Spridningsvinkeln (θ) 15° används som utgångsvärde mot bakgrund av att detta värde används i de flesta studerade analyser. Befolkningstätheten bygger på värdena som används i QRA i Holland[133]. I samband med befolkningstätheten tas hänsyn till hur många som vistas utomhus och i vilken omfattning de antas exponeras. I detta räkneexempel tas inte hänsyn till dessa faktorer då det exakta antalet avlidna inte är intressant för analysen. Antalet döda (N) erhålls genom att befolkningstätheten multipliceras med effektzonens area enligt

$$N = \text{Befolkningstätheten} * \pi * r^2 * \theta / 360$$

Beräkningen av antalet döda görs under antagandet att alla exponerade individer inom effektzonen dör och inga individer utanför effektzonen avlider. Den kummulativa frekvensen för N eller fler döda (F) är fiktiv för de olika scenarierna och hålls konstant då problematiken med framtagandet av frekvensen diskuteras i avsnitt 4.2 och 5.2.

Tabell 12. Ursprungsdata för variationer vid beräkning av FN-kurva.

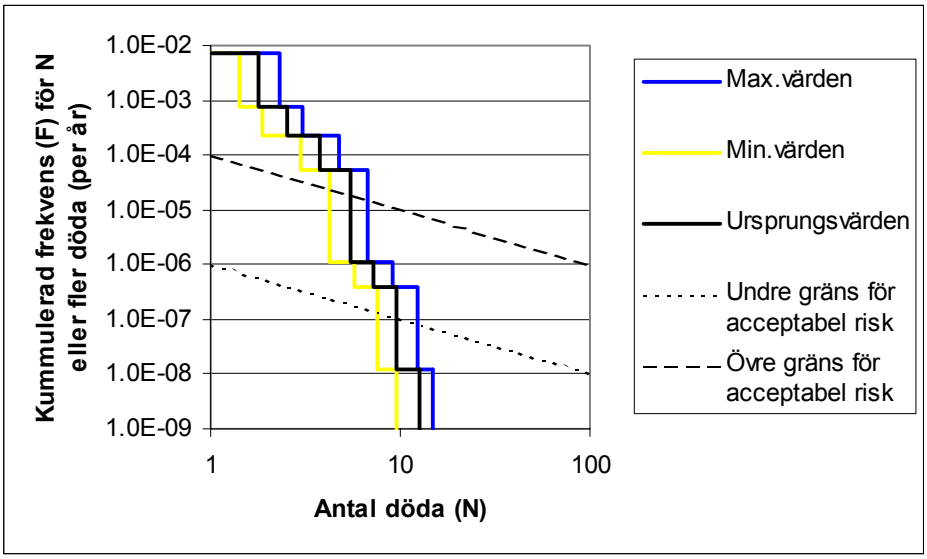
Utsläpp (kg/s)	r	θ	Befolkningstäthet (per km^2)	N	F
8.8	62	15	2500	1	7.3 E-03
13	74	15	2500	2	2.2 E-04
18	88	15	2500	3	7.3 E-04
26	107	15	2500	4	5.5 E-05
36	129	15	2500	5	1.1 E-06
48	149	15	2500	7	3.8 E-07
62	171	15	2500	10	1.2 E-08
77	196	15	2500	13	6.2 E-09

[132] Bergfeldt, M., et al, 2002
[133] Committee for the Prevention of Disasters, 1992

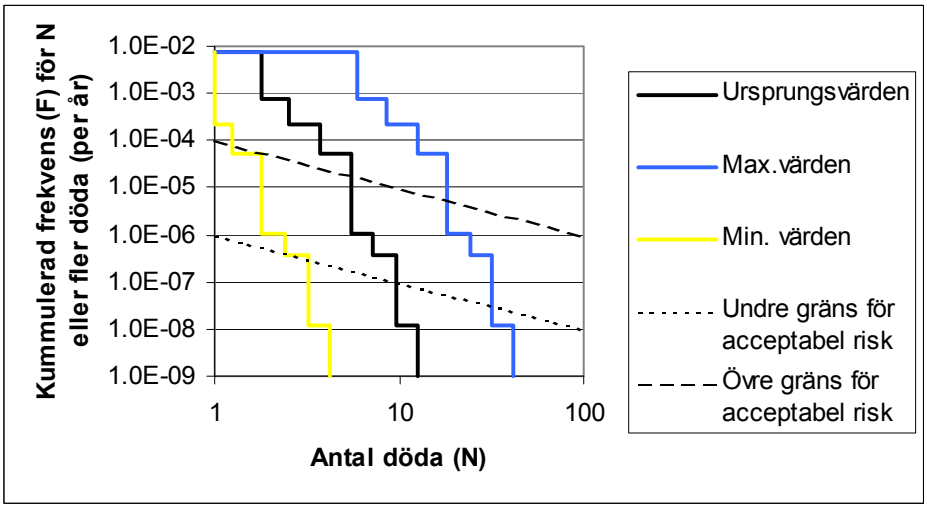
Genom att variera skadekriteriet i form av LC_{50}-värdet förändras avståndet från riskkällan vilket medför att effektzonens area påverkas. Avståndet kan också variera beroende på vilka spridningsberäkningar som görs och vilka datormodeller som används för dessa beräkningar. LC_{50}-värdet varieras mellan 8558 ppm[134] och 5760 ppm[135]. Dessa ger de minimala och maximala värdena på avståndet. Spridningsvinkeln varieras mellan 5 och 50 grader. Befolkningstätheten varieras mellan 100 och 12000 personer per km^2 vilket motsvarar landsbygd respektive mycket tätbefolkad urban miljö. Befolkningstätheten bygger på de värden som används i QRA i Holland[136].

7.3.2 Resultat och diskussion

Vid variation av parametrarna LC_{50}-värdet, spridningsvinkeln och befolkningstätheten erhålls F/N-kurvor som redovisas i Figur 19., Figur 20. och Figur 21.

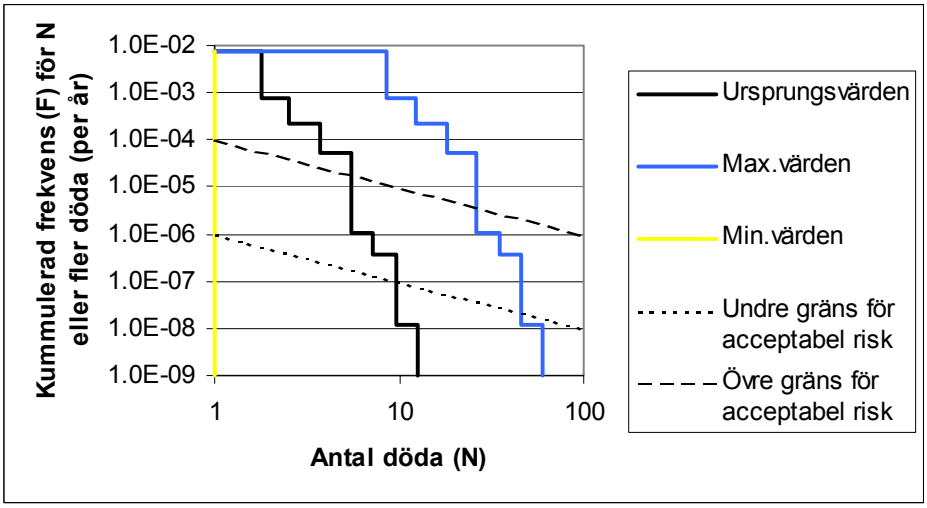


Figur 19. F/N-diagram vid variation av LC_{50}-värdet och därmed avståndet (r).



Figur 20. F/N-diagram vid variation av spridningsvinkeln (θ).

[134] Dahlberg, P., Maria, D., 2001
[135] Carlsson, J., et al, 1997
[136] Committee for the Prevention of Disasters, 1992



Figur 21. F/N-diagram vid variation av befolkningstätheten.

Resultatet av variationerna i ingående parametrar visar att skillnader i indata påverkar resultatet markant. Utöver att kvaliteten på indata i spridningsmodellen är av betydelse tillkommer själva spridningsmodellens begränsningar och felkällor. Dessa medför ytterligare osäkerheter i resultatet.

Variationer i LC_{50}-värde gör att kurvan i diagrammet förskjuts. I och med att resultatet kan variera för ett och samma skadekriterium bör resultatet variera ännu mer mellan olika typer av skadekriterier.

Spridningsvinkeln ska beräknas med hjälp av spridningsberäkningar och är därmed beroende av LC_{50}-värdet. Dock förenklas ibland denna beräkning och ett värde på spridningsvinkeln (θ) antas. Variationerna mellan de spridningsvinklar som används i denna analys är mycket stora och används inte så mycket för att spegla verkligheten utan för att påvisa hur stor inverkan parametern har på resultatet. Resultatet påvisar att med en enkel förändring i värdet på spridningsvinkeln kan stora manipulationer göras.

Befolkningstätheten påverkar resultatet i mycket stor utsträckning. Detta faktum är naturligt då det ju är antalet förolyckade som anges i resultatet. Dock poängterar det vikten av att ha tillförlitlig data som speglar den verkliga befolkningssituationen. Utöver ovan nämnda osäkerheter tillkommer även osäkerheter vid beräkningar av frekvensen generellt sett som diskuteras i avsnitt 4.2 och 5.2.

Utan tillgång till någonting att jämföra kurvorna med är informationen som finns att hämta i kurvorna begränsade. Att utföraren av riskanalysen känner till och förstår innebörden av ovanstående F/N-kurvor innebär inte att denna information kan spridas till och förstås av de personer som slutligen ska fatta besluten. För att ge tillräcklig information bör F/N-kurvorna kompletteras med kriterier för värdering av risk.

7.4 Slutsats och diskussion kring QRA:s lämplighet

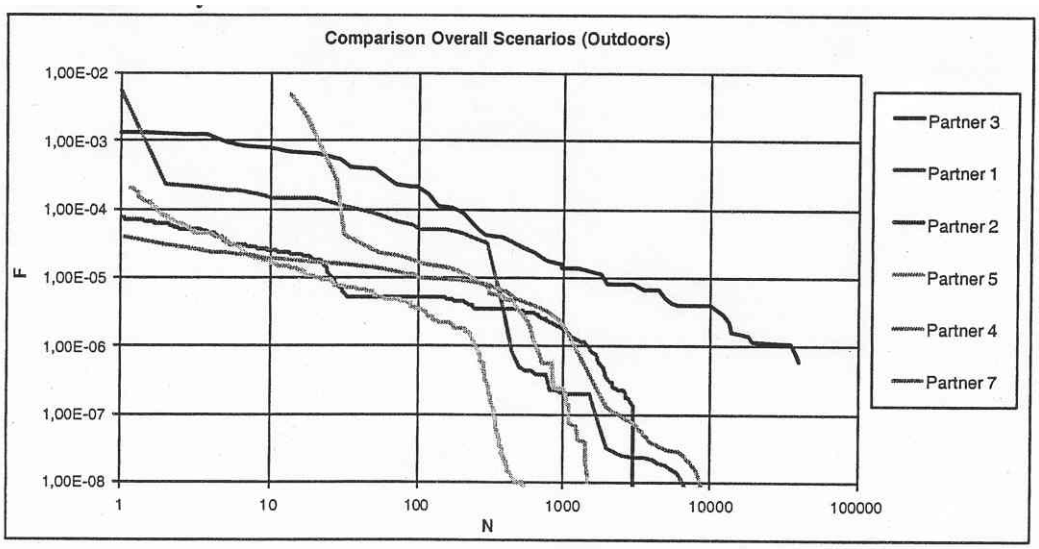
Vid användandet av QRA är det av yttersta vikt att ha tillförlitliga indata och modeller för konsekvens- och frekvensberäkningar som bra beskriver verkligheten. Vidare är det viktigt att alla indata tydligt redovisas. Parametrar som skadekriterier, spridningsvinkel och befolkningstäthet har så stor inverkan på resultatet att dåliga värden eller värden med alltför stora osäkerheter kan medföra att riskanalysen inte korrekt beskriver den verkliga risknivån. Problematiken med frekvensberäkningar belyses utförligt i avsnitt 4.2 och 5.2.

Skadekriterier innefattar stora osäkerheter. Delvis beror detta på att de olika typerna av skadekriterier var för sig innehåller osäkerheter. Värdena utgör ofta extrapoleringar från djur till människor vilket inte alltid är lämpligt eller ens möjligt och för de ämnen som inga värden finns att tillgå används ofta värden för liknande ämnen. Dessutom är många skadekriterier tidsberoende, ett faktum som ofta glöms bort och kan ge stora variationer i resultatet.

Spridningsvinkeln påverkar resultatet mycket och beräknas normalt sett med utgångspunkt från spridningsmodeller. Om så görs medför inte osäkerheterna i spridningsvinkeln så stora variationer i resultatet på grund av att variationerna i värdet på spridningsvinkeln inte är så stora. Om spridningsvinkeln antas kan dock värdet enkelt manipuleras att ge ett mindre värde på främst individrisken än vad som är fallet.

Befolkningstätheten är en viktig parameter för beräkning av samhällsrisk. Även om det inte är svårt att ta fram befolkningsunderlag för det analyserade området kan det vara problematiskt att göra framtidsprognoser för hur befolkningsstrukturen kommer att se ut i framtiden och hur detta då påverkar samhällsrisken. Dock är det viktigt att göra detta för att undvika att begränsa analysens giltighet.

Ovanstående slutsatser rör osäkerheter i indata och hur dessa påverkar resultatet av analysen. ASSURANCE-studien är ett tydligt exempel på de osäkerheter som medföljer QRA. Resultatet i samhällsriskberäkningarna varierar kraftigt beroende på vem som har utfört analysen (se Figur 22).



Figur 22. Variationer i samhällsrisk i ASSURANCE-studien (från Lauridsen, K., et al, 2001).

För att hantera osäkerheterna på ett tillfredsställande sätt bör osäkerhetsanalys enligt nivå 4 eller 5 genomföras (se avsnitt 3.4). Även om osäkerheterna i många fall kan vara betydande medför det inte automatsikt ett underkännande av riskanalysmetoden. QRA-metodiken är en riskanalysmetod som är användbar i många situationer och som trots sitt beroende av tillfredsställande indata är en bra och heltäckande metod för att analysera ett systems risker. Då metodiken innebär en omfattande och djuplodande analys av både sannolikheten för och konsekvenserna av olika händelser anses att QRA är lämplig som metod för risk- och sårbarhetsanalys. Det är inte alltid resultatet i sig som ger mest information utan det är det systematiska tillvägagångssättet som ger en heltäckande bild av systemets risksituation. I synnerhet gäller detta i de fall då kriterier för värdering av risk ej finns att tillgå. Det bör dock poängteras att QRA är en mycket resurskrävande metod och innan en QRA skall genomföras bör mervärdet med analysen jämföras med den arbetsinsats som krävs för analysen.

Det finns idag inga nationella kriterier för värdering av risk i Sverige. I många situationer upplevs detta som negativt då resultatet av riskanalyser i form av individriskkonturer/-profiler eller F/N-kurvor ses som svårbedömt, inte minst för beslutsfattaren. I avsaknad av nationella kriterier har man i vissa fall på regional och lokal nivå bestämt sig för att använda egna kriterier för värdering av risk. Detta kan vara negativt då risken finns att detta leder till en ojämn bedömning i olika delar av landet. Även om riskkriterier saknas medför användningen av QRA en systematisk analys av ett systems risker och därmed erhålls ett bra underlag för en effektiv riskhantering. Dock kan sägas att fokus för analysen skjuts ifrån att ligga på ett enskilt värde eller en kurva till att se helheten i problematiken. Detta ställer höga krav på såväl utföraren som granskaren och användare av analysen att själv bedöma och värdera riskanalysen.

8 Alternativ och komplement till analyserade metoder

Den analys som gjorts av riskanalysmetoderna händelseträd, felträd, VTI-metoden och QRA påvisar att metoderna har vissa brister och att det finns problem knutna till dem. Mot bakgrund av detta har alternativa metoder och angreppssätt studerats och redovisas nedan.

8.1 Kvantitativa riskanalyser i andra länder

8.1.1 Kvantitativa riskanalyser i Holland

Vid en QRA används ett stort antal indata och ett flertal beräkningsmodeller för konsekvensberäkningar. För att erhålla ett bra resultat krävs tillförlitliga indata och modeller som ger en bra bild av verkligheten. Tillgången på tillförlitliga indata är många gånger begränsad vilket medför att flera antaganden och förenklingar måste göras. Det finns en mängd olika beräkningsmodeller och datorprogram för spridnings- och konsekvensuppskattning. Bristen på indata och olika sätt att beräkna konsekvenserna av en olycka med farligt ämne medför att resultaten av en QRA kan vara mycket varierande. Ytterligare ett problem med QRA är svårigheterna med att bedöma resultatet. Om resultatet redovisas i form av F/N-kurvor och/eller individriskkonturer måste kriterier för värdering av risk finnas för att resultatet ska ge tillfredsställande information om risknivån för systemet.

Ett sätt att komma till rätta med ovanstående problem är att standardisera QRA, något som de holländska myndigheterna gjort. I Holland har ingående instruktioner och så kallade guidelines tagits fram för genomförande av kvantitativa riskanalyser gällande hantering, förvaring och transport av farliga ämnen[137]. Syftet med dessa guidelines är att resultaten från QRA som används som beslutsunderlag ska vara kontrollerbara, reproducerbara och jämförbara. Detta anses uppnås om analyserna bygger på liknande modeller och indata.

De så kallade guidelines följer arbetsgången i QRA och är mycket detaljerade. Först beskrivs en metod för hur de installationer eller system som ska analyseras djupare ska väljas. Vidare ges felfrekvenser för tänkbara scenarier som kan leda till utsläpp, instruktioner om hur utsläpps- och spridningsberäkningar ska genomföras samt vilka konsekvensberäkningar som ska göras. Slutligen ges instruktioner för hur resultatet ska redovisas. Resultaten ska redovisas som individ- och samhällsrisk och jämföras med fastställda kriterier för acceptabel risk. Avvikelser kan göras från guidelines om utföraren använder modeller som ger bättre resultat än de som beskrivs i guidelines och dessutom diskuterar saken med myndigheter och ansvariga för anläggningen.[138]

Arbetsgången för den Holländska standarden beskrivs huvudsakligen i boken *Guidelines for Quantitative Risk Assessment,* också känd som *”Purple Book”*[139]. Till den finns detaljerade beskrivningar för sannolikhetsberäkningar i *Methods for determining and process probabilities (”Red Book”)*[140], spridningsberäkningar i *Methods for the calculation of physical effects, part 1 and 2 (”Yellow Book”)*[141] samt konsekvensberäkningar i *Methods for the determination of possible damage (”Green Book”)*[142].

[137] Uijt de Haag et al, 1999
[138] Committee for the Prevention of Disasters, 1999
[139] Committee for the Prevention of Disasters, 1999
[140] Committee for the Prevention of Disasters, 1997 (a)
[141] Committee for the Prevention of Disasters, 1997 (b)
[142] Committee for the Prevention of Disasters, 1992

8.1.2 Kvantitativa riskanalyser i Storbritannien

I Storbritannien används riktlinjer för riskanalyser för hantering, förvaring och transport av farliga ämnen. HSE (Health and Safety Executive) har tagit fram ett antal rekommenderande riskkriterier för individrisk och samhällsrisk både när det gäller fysisk planering och farligtgodstransporter. De har dock inte lika strikta regler kring genomförandet av riskanalysen som de holländska myndigheterna. När de brittiska myndigheterna ställer krav på en verksamhet att genomföra en riskanalys gör myndigheterna själva en egen analys av den aktuella verksamheten. Sedan jämförs de båda riskanalyserna och eventuella skillnader i resultat diskuteras innan resultatet fastställs och jämförs med fastställda kriterier.[143]

8.2 Riskanalysmetoder för transport av farligt gods

Det finns idag få metoder för riskanalys av farligtgodstransporter. Detta beror till stor del på att riskerna vid transport skiljer sig från andra system i det att riskkällan inte är stationär. Dessutom finns det risker som är förknippade med stationära riskkällor även vid transport av farligt gods. Exempel på detta är risker vid lastning och lossning av det farliga godset.

För kvantitativ riskanalys av transport med farligt gods finns i de holländska guidelines ett speciellt avsnitt. Det finns tre olika angreppssätt beskrivna; tröskelvärden, ett specialutvecklat datorprogram och en detaljerad QRA. Tröskelvärdena ger en indikation om risknivån och om frekvensen av transporter överskrider de specificerade tröskelvärdena ska en mer detaljerad kvantitativ analys göras. Med hjälp av datorprogrammet IPORBM kan individ- och samhällsrisk relativt enkelt beräknas för en viss specificerad sträcka. Dock kan resultatet från datorprogrammet behöva kompletterande beräkningar i form av en detaljerad kvantitativ riskanalys. Den detaljerade QRA:n för transport av farligt gods beskrivs och följer i stort sett samma arbetsgång som QRA för fasta installationer. De acceptanskriterier som tagits fram för transport av farligt gods skiljer sig något från de kriterier som gäller stationära anläggningar[144]. Generellt sett är kriterierna för transport av farligt gods något strängare än för de fasta anläggningarna.

En av de få metoder som finns påminner till viss del om VTI-metoden där fasta olycksfrekvenser beroende på typ av gods kombineras med konsekvensberäkningar baserade på förenklade kategorier med befolkningstäthet[145]. Denna metod har efterhand utvecklats och ligger till grund för den metod som används i Storbritannien och kallas Transport Risk Assessment Tool[146]. I förhållande till VTI-metoden är konsekvensbedömningen för Transport Risk Assessment Tool mer differentierad medan frekvensbedömningarna är lika bristfälliga. Problemet med risker i samband med lastning och lossning av det farliga godset har beaktats och diskuterats, bland annat i Kanada, men några direkt användbara metoder finns inte att tillgå[147].

Ett annat kvantitativt tillvägagångssätt för analys av risker förknippade med transport av farligt gods är identifiering av så kallade Hot spots[148]. Hot spots definieras som platser med både hög sannolikhet för och stora konsekvenser av en olycka. För att identifiera Hot spots kan tre olika tillvägagångssätt användas; utveckling av en modell genom att använda ett antal särskilda kriterier, empirisk identifiering med hjälp av analys av statistiska data över olyckor

[143] Petersen, K., 2002
[144] Räddningsverket, 1997
[145] Purdy, G., 1993
[146] Leeming, D., 1993
[147] Griffin, B.J., Auld, R.G., 1993
[148] Gheorghe, A.V., 1999

eller genom användandet av geografiska informationssystem (GIS). Metodiken med Hot spots är under utveckling och målet är att ta fram en systematisk metodik och ett användbart beslutsverktyg inom området för riskberäkningar av transport av farligt gods.

8.3 Anticipatory Failure Determination (AFD)

För att komma till rätta med problemet att identifiera samtliga risker i ett system har en metod med namnet Anticipatory Failure Determination (AFD) utvecklats. Metoden bygger på teorin om hur scenarier struktureras (the Theory of Scenario Structuring). Denna teori menar att det i varje verklig situation finns en stor mängd möjliga scenarier. Problemet ligger i att strukturera och organisera dessa många scenarier så att de viktiga scenarierna identifieras och skiljs från de mindre viktiga. Teorin menar på att identifiera och strukturera möjliga scenarier är en kombination av vetskap och konst som kräver stor kreativitet och fantasi. Det kan sägas finnas tre grundläggande metoder för att identifiera möjliga scenarier[149]:

1. Identifiera möjliga initialhändelser och härleda följdhändelser till varje initialhändelse.
2. Identifiera viktiga sluthändelser och härled orsakande händelser till varje sluthändelse.
3. Identifiera viktiga mellanliggande händelser och härled orsakande händelser och följdhändelser till varje mellanliggande händelse.

Exempel på riskanalysmetoder som använder ovanstående metoder är FMEA (metod 1), felträd (metod 2) och HAZOP (metod 3). AFD kan ses som ett komplement till dessa traditionella riskanalysmetoder. Metoden består av två olika delar; en del för analys av feltillstånd som redan har uppkommit (AFD-1) och en del för att identifiera scenarier som ännu inte uppstått (AFD-2). För att passa in i terminologin som används vid strukturering av scenarier kan sägas att AFD-1 startar i en given initialhändelse eller mellanliggande händelse och försöker bestämma det eller de scenarier som lett till detta tillstånd. AFD-2 kan sägas försöka identifiera samtliga initialhändelser, mellanliggande händelser och sluthändelser tillsammans med de scenarier som leder till eller från dessa tillstånd. AFD-1 utgör en reaktiv metod medan AFD-2 är proaktiv.

AFD skiljer sig från övriga riskanalysmetoder i vissa avseenden. Traditionella riskanalyser bygger på att analysera och förklara feltillstånd som tidigare uppstått för att förhindra dem från att uppstå igen. Detta är bra men inte tillräckligt då det inte identifierar scenarier som aldrig tidigare inträffat. En del av AFD fokuserar därför på att förutsäga och förebygga feltillstånd. AFD utgår ifrån det faktum att för att ett visst tillstånd ska uppnås krävs att en rad komponenter måste vara tillgängliga inom systemet. När traditionella riskanalysmetoder i preventivt syfte ställer frågan ”Vad kan gå fel?” ställer AFD-2 frågan ”Om man vill att något ska gå fel – hur gör man det så effektivt som möjligt?”. Istället för frågan ”Hur uppstod detta feltillstånd?” ställer man på motsvarande sätt i AFD-1 frågan ”Om man vill åstadkomma detta feltillstånd – hur gör man då?”. AFD handlar alltså om ett nytt angreppssätt gentemot felhändelser och feltillstånd.

För att underlätta tillämpningen av AFD har mallar utarbetats för de två olika delarna. För AFD-1 består mallen av följande steg:

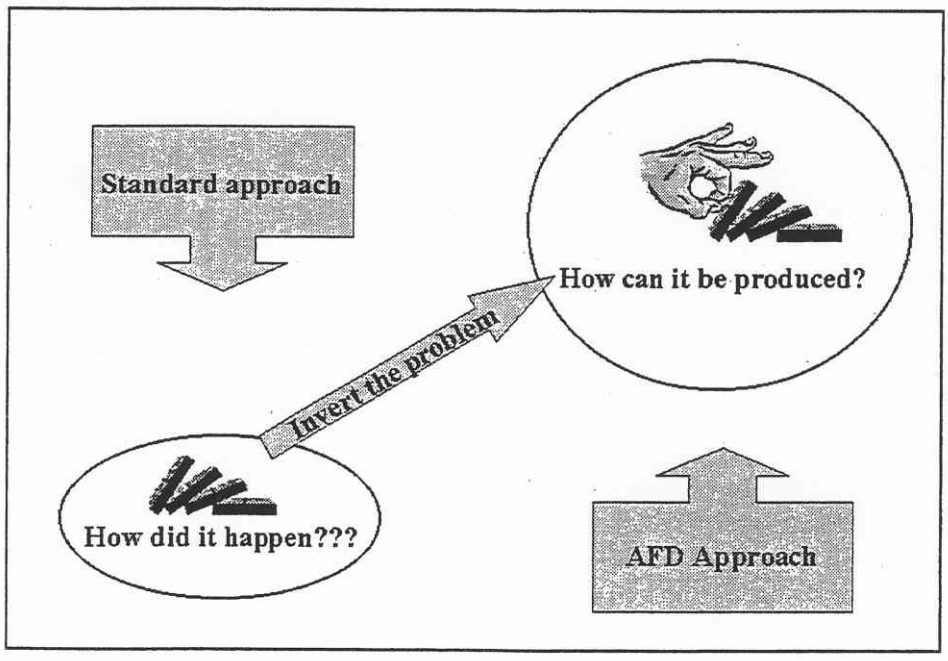
Steg 1: Formulera utgångsproblemet. Till att börja med bestäms utgångssituationen eller ursprungsproblemet. Detta inkluderar att identifiera och avgränsa det analyserade systemet, ange syftet och beskriva felet eller feltillståndet.

[149] Kaplan, S., et al, 1999

Steg 2: Identifiera det avsiktliga scenariot. Systemets rätta eller riktiga funktion, det vill säga det systemets avsiktliga scenario, beskrivs.

Steg 3: Lokalisera feltillståndet. Nästa steg är att lokalisera i vilken fas eller i vilken del av systemet felet eller feltillståndet uppstått. Syftet med detta är att avskriva de delar av systemet som omöjligen kan ha orsakat feltillståndet så att dessa delar hamnar utanför själva analysen.

Steg 4: Formulera och förstärk det inverterade problemet. I steg fyra omformuleras utgångsproblemet till ett inverterat problem genom att identifiera hur man skapar felet eller feltillståndet. Istället för att gissa på möjliga orsaker till felet ”inverteras” problemet som ”För att åstadkomma felet krävs…” (se Figur 23). Utöver att omformulera problemet förstärks eller överdrivs felet för att göra det mer levande och stimulera till kreativa tankar.



Figur 23. Invertering av problemställningen enligt AFD (från Kaplan, S., et al, 1999).

Steg 5: Sök lösningar. Nästa steg är att söka lösningar till den omformulerade och förstärkta problemställningen. I och med inverteringen av problemet har fokus flyttats från saker som kan inträffa till saker som kan åstadkommas. Detta är viktigt inte bara för att det medför ett nytt angreppssätt utan för att det för in analysen på ett annat område; nämligen metoder för att åstadkomma det önskade scenariot. Till att börja med identifieras de uppenbara eller självklara lösningarna till problemet. För att sedan hitta övriga lösningar identifieras de resurser (i form av tid, energi, information, funktioner och materiel) som krävs för att åstadkomma det önskade scenariot. Om samtliga resurser finns att tillgå på samma gång åstadkoms scenariot. För att underlätta identifieringen av samtliga resurser finns checklistor och mjukvaror till hjälp.

Steg 6: Formulera hypoteser och skapa test för att verifiera dem. Det näst sista steget i mallen för AFD-1 är att formulera hypoteser för hur felet eller feltillståndet uppstått. För att verifiera hypoteserna skapas de test som är nödvändiga.

Steg 7: Korrigera feltillståndet. Slutligen specificeras olika åtgärder för att förhindra felet eller feltillståndet att uppstå igen.

Mallen för AFD-2 liknar den för AFD-1. Inledningsvis formuleras i steg 1 utgångsproblemet. Skillnaden mot AFD-1 ligger i att för AFD-2 beskriver man alla tänkbara fel eller feltillstånd som kan uppstå i systemet. Steg 2 är samma som ovan, nämligen en identifiering av det avsiktliga scenariot. Nästa steg är att formulera det inverterade problemet. Här identifieras hur samtliga fel eller feltillstånd skapas eller åstadkoms.

I steg 4 anges alla de uppenbara fel eller feltillstånd som kan tänkas uppstå i systemet. Med hjälp av initialhändelser, mellanliggande händelser och sluthändelser byggs en lämplig trädstruktur upp som visar de scenarier som innehåller de identifierade uppenbara felen eller feltillstånden. I steg 5 kompletteras listan på uppenbara fel med de mer svåridentifierade feltillstånden. Detta görs genom att titta på de resurser (i form av tid, energi, information, funktioner och materiel) som finns att tillgå i systemet. Till hjälp i detta steg finns en mängd checklistor och mjukvaror. För att beakta ytterligare potentiella feltillstånd studeras i steg 6 även andra initialhändelser, mellanliggande händelser och sluthändelser. Eventuella upptäckta scenarier läggs till i trädstrukturen.

I steg 7 anges ytterligare och mer detaljerade orsaker till de sluthändelser och mellanliggande händelser som identifierats. De möjliga scenarier som nu tagits fram förstärks och intensifieras. Resultatet av analysen består nu av ett träd med ett stort antal möjliga scenarier med mer eller mindre omfattande konsekvenser. Trädstrukturen används nu till att förebygga och helst eliminera de identifierade felen eller feltillstånden. Detta kan göras genom att eliminera orsakerna, det vill säga de ingående grenarna till en händelse, eller genom att minska konsekvenserna, det vill säga eliminera de utgående grenarna från händelsen.

Det som är nytt med AFD är metodens sätt att invertera problemställningen. Genom att fråga sig hur ett fel eller feltillstånd kan åstadkommas istället för att fråga vad som kan gå fel undviks risken att möjliga scenarier förnekas. Det är en vanlig mänsklig egenskap att undvika att tänka på obehagliga eller oönskade saker och detta kan ha en negativ påverkan på möjligheterna att identifiera samtliga möjliga scenarier. Genom att invertera problemet undviks situationer där personer ska identifiera vad som kan gå snett i det ”egna” systemet. Denna situation orsakar ofta en defensiv mental inställning där risken att förneka eller inte se brister i systemet är uppenbar. Istället skapas med AFD en situation där man fritt kan kasta fram idéer om hur ett fel eller ett feltillstånd kan skapas.

En annan positiv effekt av att invertera problemställningen är att tillgången på litteratur och data ökar. Den information som finns tillgänglig rörande orsaker till fel är väsentligt mindre än den information som finns för hur vissa tillstånd uppnås. Detta beror också på den mänskliga naturen. De flesta personer är inte alltid villiga att dokumentera och publicera fel eller feltillstånd.

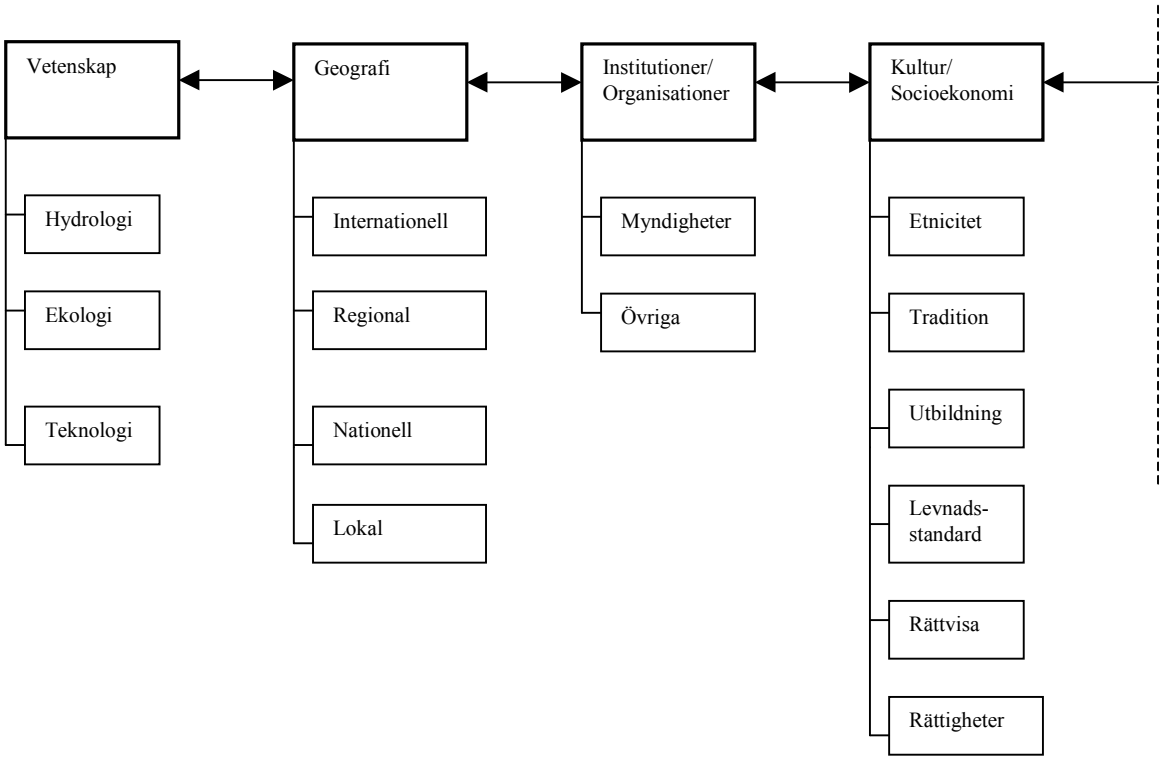
Det stora problemet med AFD är att inte heller med denna metod är det säkert att samtliga möjliga scenarier identifierats. Metoden tillhandahåller ett tillvägagångssätt som förbättrar möjligheterna att identifiera samtliga scenarier men ingen garanti finns för att så blir fallet. I och med att metoden är så ny och relativt oanvänd har inte heller formerna för metoden riktigt hittats. De checklistor och mjukvaror som finns till hjälp behöver revideras och uppdateras kontinuerligt.

I och med att metoden medför ett helt nytt angreppssätt och ett nytt sätt att tänka på behövs stora insatser för att lära ut metoden som för nya användare kan verka alltför abstrakt. AFD bör ses som ett komplement och inte en ersättning av traditionella riskanalysmetoder.

8.4 Hierarchical Holographic Modelling (HHM)

Ytterligare ett sätt att underlätta riskidentifieringen är att kartlägga ett systems olika ingående parametrar i ett hierarkiskt schema. Hierarchical Holographic Modelling (HHM)[150] är en modell som bygger på principen att dela upp systemet i olika delgrupper och sedan undergrupper till dessa. På så sätt erhålls en visuell struktur på de parametrar som påverkar ett system. Modellen ger en bild av systemet som är holografisk på så sätt att systemet granskas ur ett flertal olika perspektiv. Ett exempel är miljörisker (se Figur 24) där ett stort antal parametrar och aspekter påverkar risken för skador på miljön.

Systemet granskas med hjälp av strukturen ur flera olika perspektiv vilket leder till att identifiering av vad som kan gå fel med respektive parameter. Det hierarkiska schemat kan också åskådliggöra parametrar och händelser som interagerar. Strukturen ger också en bra bild av hur händelser i en kategori påverkar resten av systemet. Genom att se till samtliga hierarkiska strukturer som finns för ett system kan man lättare förstå det totala systemet och därmed finna tänkbara riskkällor.



Figur 24. Exempel på HHM-struktur för identifiering av miljörisker (från Haimes, Y., 1998).

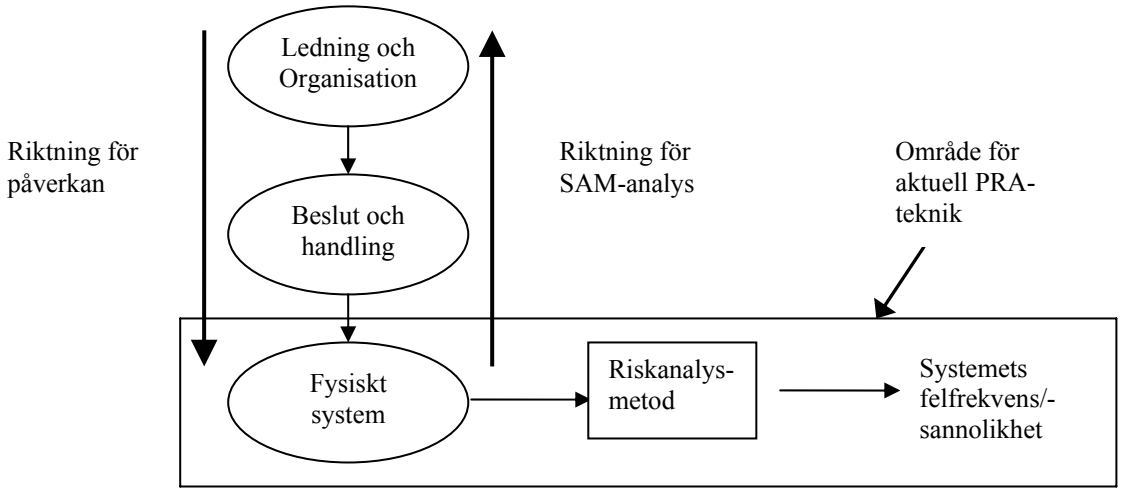
Modellens fördelar är att den är applicerbar på en mängd olika system alltifrån tekniska till organisatoriska system och det är lätt att följa riskerna i stora system. För att underlätta riskidentifieringen och strukturera systemets ingående parametrar kan modellen med fördel

[150] Haimes, Y., 1998

användas som ett komplement till andra riskanalysmetoder. HHM kan användas i såväl planeringsstadie som under drift.

8.5 System Action Management (SAM)

Förutom problemen med att identifiera samtliga möjliga händelser tillkommer svårigheter med att knyta ”rätt” sannolikhet/frekvens till respektive händelse. Uppskattningsvis beror 50-90 % av alla olyckor på mänskliga eller organisatoriska faktorer[151]. Många riskanalysmetoder fokuserar på tekniska system utan att ta hänsyn till kopplingen mellan teknik och mänskliga och organisatoriska faktorer. En anledning till detta är de stora svårigheter med att finna frekvenser och sannolikheter för dessa faktorer då osäkerheterna är mycket stora. System Action Management (SAM) är en analytisk arbetsgång som tagits fram för att försöka strukturera och kvantifiera mänskliga och organisatoriska faktorer[152]. Resultatet från metoden kan dels föras in i kvantitativa riskanalyser, dels användas för att avgöra hur förändringar i organisation och ledning kan påverka säkerheten i det tekniska systemet. Strukturen för SAM kan illustreras enligt Figur 25.



Figur 25. Struktur för SAM (från Murphy, D.M., Paté-Cornell, E., 1996).

Mänskliga beslut och handlingar påverkar risken för fel i fysiska system på flera sätt; en handling kan direkt ge upphov till ett fel i systemet, systemet kan vara felkonstruerat, undermåligt underhåll kan öka sannolikheten för fel hos enskilda komponenter m.m. Organisatoriska faktorer som utbildning, policy, arbetstider etc. påverkar det mänskliga agerandet och därmed indirekt sannolikheter för fel i det fysiska systemet. Eftersom mänskligt agerande är mycket komplext och svårt att analysera används fyra olika modeller i SAM för att modellera och kvantifiera olika typer av beteende. De fyra modeller som används i SAM är: den rationella modellen med teori om förväntad nytta, den begränsade rationella modellen, den regelbaserade modellen och den verkställande modellen. Vid en analys av hur mänskliga och organisatoriska faktorer påverkar ett system kan flera av dessa modeller som ingår i SAM användas.

1. Den rationella modellen med teori om förväntad nytta innebär att individen agerar efter vad som är bäst för dem själva, det vill säga att individen får ut maximal förväntad nytta av sitt

[151] Murphy, D.M., Paté-Cornell, E., 1996
[152] Murphy, D.M., Paté-Cornell, E., 1996

beslut. De osäkerheter som följer med denna modell är dels den enskilda individens subjektiva osäkerheter gällande konsekvenserna som följer beslutet, dels ledningens osäkerheter om vilka parametrar som påverkar beslutsfattaren. Ett händelseträd kan illustrera de olika alternativen som beslutsfattaren står inför och de konsekvenser som följer beslutskedjan. Sannolikheten för att individen ska välja ett visst alternativ kan räknas fram. Ett exempel är en bilförares val av hastighet; ju fortare han/hon kör desto snabbare kommer han/hon fram till målet, vid en viss gräns finns risken för böter och bötessumman stiger med en högre hastighet.

2. Den begränsade rationella modellen tillämpas i de beslutssituationer där individen är oförmögen att fatta objektiva beslut på grund av kognitiva begränsningar. Det är då inte bara egna intressen som styr beslutet, utan brister i kunskap och förenklingar av problemet som leder till ett icke-optimalt beslut. Ett händelseträd kan illustrera de olika alternativen beslutsfattaren står inför. Modellen ger möjlighet att räkna fram sannolikheten för olika beslutskedjor. Ett exempel är en bilförares val vid dåligt väder; ska han/hon köra och riskera en trafikolycka, vänta tills det blivit bättre väder eller välja en annan väg med bättre underlag trots att det blir en omväg.

3. Den regelbaserade modellen baseras på Rasmussens[153] sätt att beskriva regelbaserat beteende där individen handlar efter ett antal inlärda regler som passar för vissa situationer. Regelbaserat beslut används då individen känner igen situationer och inte överväger andra alternativ. Den regelbaserade beslutsprocessen kan delas i två delar där individen först identifierar situationen och sedan väljer och använder en för situationen passande regel. Sannolikheter för att individen ska identifiera en viss situation, givet att det är ”rätt” kan beräknas. Även sannolikheter för att individen ska tillämpa en viss regel för en aktuell situation kan räknas fram. Detta kan också illustreras med ett händelseträd. Ett exempel är i vilket skick en bils bromsar är. Om en bilmekaniker gör rätt eller fel bedömning och åtgärder vid kontroll av bromsarna avgör vilket skick bromsarna är i.

4. Den verkställande modellen innebär att förhållandet mellan individens förmåga och vilken prestation som krävs av henne/honom beaktas. Faktorer som påverkar detta förhållande är exempelvis individens mentala kapacitet, erfarenheter, utbildning, systemets komplexitet och arbetstider. Sannolikheten för att en viss ”typ av individ” ska kunna prestera en specifik uppgift kan räknas fram. Ett exempel är en bilförares förmåga att undgå en trafikolycka då faktorer som exempelvis erfarenheter och trötthet spelar in.

Med hjälp av SAM underlättas kvantifieringen av mänskliga felhandlingar. De fyra olika modellerna medför att de mänskliga faktorerna kartläggs från flera olika perspektiv. Dock försvinner inte problematiken med svårigheter med att ta fram frekvenser och sannolikheter för mänskliga felhandlingar. Vid användandet av metoden måste de stora osäkerheter som kvantifiering av mänskliga felhandlingar medför uppmärksammas och resultatet ska ses som en vägledning och inte som ett exakt värde.

SAM är applicerbar på en mängd olika verksamheter och har använts inom flera olika områden och inte bara inom de traditionellt tekniska[154,155]. Metoden har bland annat använts på transport av farligt gods, inom rymdindustrin och för patienters säkerhet vid nedsövning vid operationer. Efter en olycka på en oljeplattform användes SAM för att utreda vilka

[153] Rasmussen, J., Svedung, I., 2000
[154] Murphy, D.M., Paté-Cornell, E., 1996
[155] Paté-Cornell, M.E., Murphy, D.M., 1996

mänskliga och organisatoriska faktorer som låg bakom olyckan och vilka åtgärder som skulle kunna förhindra att olyckan upprepades.

En av fördelarna med SAM är att metoden utöver en kartläggning och en kvantifiering av mänskliga faktorers inverkan på ett system även ger möjligheter att se vilka organisatoriska faktorer som kan påverka säkerheten för ett system.

9 Sammanfattande diskussion

Det ställs allt hårdare krav på att öka beredskapen för svåra påfrestningar och som ett led i detta finns det numera uttryckliga lagkrav på genomförandet av risk- och sårbarhetsanalys. Det finns idag inga tydliga instruktioner för hur dessa ska genomföras och därför används i denna rapport traditionella metoder för riskanalys som utgångspunkt för diskussionen kring vilka metoder som är lämpliga för risk- och sårbarhetsanalys inom processindustri och för transport av farligt gods. Efter att ha analyserat Felträdsanalys, Händelseträdsanalys, QRA och VTI-metoden anses de tre förstnämnda metoderna vara lämpliga för risk- och sårbarhetsanalys. VTI-metoden innehåller så stora brister att den inte anses vara lämplig som analysmetod.

Transport av farligt gods är ett problemområde som många brottas med, både internationellt och nationellt. Det har inträffat ett antal svåra tillbud i Sverige där konsekvenserna kunnat bli förödande exempelvis olyckorna i Kävlinge (1996), Kälarne (1997) och Borlänge (2000). Det som särskiljer transport av farlig gods från andra risker är att riskkällan är rörlig och därmed varierar förutsättningarna kraftigt beroende på vilken del av transportsträckan som analyseras. Då den metod som används till stor del i Sverige, VTI-metoden, inte är tillräckligt bra är behovet av alternativa metoder stort. Dock är antalet alternativ begränsade och de metoder som finns bedöms inte ge särdeles mycket bättre resultat än VTI-metoden. Det är bekymmersamt att det inte finns riskanalysmetoder som ger en korrekt beskrivning av riskerna med transport av farligt gods. I väntan på att bättre metoder finns att tillgå bör QRA genomföras även vid transport av farligt gods under förutsättning att det faktum att riskkällan inte är stationär beaktas.

Även om Felträdsanalys, Händelseträdsanalys och QRA anses vara tillämpbara för risk- och sårbarhetsanalys innehåller metoderna vissa brister eller begränsningar. Beträffande Felträdsanalys och Händelseträdsanalys, och därmed också till viss del QRA, ligger begränsningarna i att det inte är säkert att alla möjliga scenarier identifierats. För att komma tillrätta med detta bör användningen av dessa metoder kompletteras med exempelvis Anticipatory Failure Determination (AFD) och/eller Hierarchical Holographic Modelling (HHM). AFD är en metod som tack vare ett annorlunda angreppssätt underlättar identifieringen av samtliga scenarier. HHM är en modell för strukturering av problemområden som underlättar en systematisk identifiering av möjliga scenarier.

Ett annat problem som finns med analysmetoderna är att tillskriva olika händelser ”rätt” sannolikheter/frekvenser då det statistiska underlaget ofta är bristfälligt. I synnerhet gäller detta för mänsklig tillförlitlighet och påverkan av organisatoriska faktorer. För att erhålla ett bättre underlag för mänsklig tillförlitlighet kan System Action Management (SAM) användas. SAM är en analytisk arbetsgång som tagits fram för att försöka strukturera och kvantifiera mänskliga och organisatoriska faktorer.

De sannolikheter/frekvenser som inte härrör från mänskliga eller organisatoriska faktorer är också ett stort problem. ASSURANCE-studien visar att även om det analyserade systemet är väl definierat kan resultatet ge stora variationer beroende på bland annat variationer i indata. För att hantera denna situation är det av stor vikt att belysa och kvantifiera de osäkerheter som är förknippade med analysen. Ett annat sätt att beakta problemet är att, som i Holland, standardisera hela förfarandet med kvantitativ riskanalys. Genom att standardisera vilka sannolikheter/frekvenser som knyts till de olika parametrarna underlättas jämförelser mellan olika system och risknivåer. Med standardisering underlättas också värdering av risk.

Exempelvis kan kriterier för värdering av risk fastställas för att avgöra vilka risknivåer som anses vara acceptabla. Ytterligare ett alternativ är att följa det angreppssätt som används i Storbritannien där myndigheten och verksamheten gör var sin riskanalys parallellt med varandra och sedan jämför resultaten och diskuterar eventuella variationer. Detta angreppssätt ger utförare av riskanalyser fria händer beträffande val av metod. Riskanalyser av verksamheter blir kvalitetssäkrade då två analyser görs parallellt och sedan jämförs med varandra. Dock krävs det mycket tid av myndigheterna att själva utföra analyser och därmed är det tveksamt om detta sätt är ekonomiskt försvarbart.

I Sverige finns idag inga nationella kriterier för värdering av risk. Detta kan upplevas som negativt och ge vissa svårigheter vid bedömning av resultatet från kvantitativa riskanalyser. På flera ställen i Sverige har lokala riktlinjer ställts upp för värdering av risk vilket kan leda till en ojämn bedömning i olika delar av landet.

Räddningsverket har tagit fram en rapport[156] för att ge ett underlag för diskussion och fortsatt utredning av acceptanskriterier. De acceptanskriterier som anges i rapporten är endast ett förslag till grund vidare diskussion och de är inte tänkta att vara fastlagda kriterier för värdering av risk. Trots detta används rapportens kriterier som lokala riktlinjer på flera ställen i Sverige. Rapportens författare poängterar att acceptanskriterierna som anges i rapporten inte är så väl underbyggda att de kan utgöra nationella, regionala eller lokala acceptanskriterier[157]. Beträffande standardisering av kvantitativa riskanalyser och införandet av nationella kriterier för värdering av risk bör frågan utredas noggrant. Rådande situation med kriterier i vissa delar av landet som dessutom inte är anpassade efter svenska förhållanden är ohållbar. Att använda kriterier för värdering av risk utan att standardisera riskanalysförfarandet är inte lämpligt då det är alltför lätt att komma fram till att risknivån är acceptabel genom att variera indata.

Felträdsanalys, Händelseträdsanalys och QRA kan, tillsammans med AFD, HHM och SAM, sägas utgöra grunden i en verktygslåda för genomförandet av risk- och sårbarhetsanalys inom teknisk infrastruktur. Framtida forskning bör inriktas mot att specialanpassa dessa metoder till risk- och sårbarhetsanalys. För motsvarande analyser inom transportområdet måste nya metoder utvecklas.

[156] Räddningsverket, s. 1-2, 1997
[157] Davidsson, G., 2002

10 Referenser

10.1 Tryckta källor

Abrahamsson, M., *Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterisation and Methods of Treatment,* Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2002

Andrews, J.D., Moss T.R., *Reliability and Risk Assessment*, Longman Scientific & Technical, 1993

Ang, A.H-S., Tang, W.H. *Probability concepts in Engineering Planning and Design, Volume 1 – Basic Principles*, John Wiley & Sons, New York, 1975

Bergfeldt, M., et al, *Sorgenfri industriområde. Riskanalys med planförslag*. Rapport 9190, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2002

Carlsson, J., et al, Osäkerhetsanalys: Tretornområdet, Helsingborg, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1997

Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for CPQRA - Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2nd edition, USA, 2000.

Committee for the Prevention of Disasters, *Guideline for quantitative risk, "Purple book"*, CPR 18E, The Hague, Holland, 1999

Committee for the Prevention of Disasters, *Methods for determining and process probabilities, "Red book"*, CPR 12E, The Hague, Holland, 1997 (a)

Committee for the Prevention of Disasters, *Methods for the calculation of physical effects, part 1 and 2, "Yellow book"*, CPR 14E, The Hague, Holland, 1997 (b)

Committee for the Prevention of Disasters, *Methods for the determination of possible damage, "Green book"*, CPR 16E, The Hague, Holland, 1992

Dahlberg, P., Maria, D., *Riskstudie av farligtgodstransporter i Norra Stockholms län*, Rapport 5091, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2001

European Commission, Land Use Planning Issues in the Context of Accident Hazards – An Analysis of Procedures and Criteria in selected EU Member States, Report EUR1652EN, 1996

European Commission, Report on Land Use Planning Controls for Major Hazard Installations in the European Union, Report EUR15700EN, 1994

Frantzich, H., *Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering,* Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1998

Fredén, S., *Användning av analysmetoden – Ett fiktivt beräkningsexempel*, VTI rapport 387:6, 1994 (a)

Fredén, S., *Modell för skattning av sannolikheten för järnvägsolyckor som drabbar omgivningen*, Banverket, Miljösektionen, Borlänge, 2001

Fredén, S., *Om sannolikhet för järnvägsolyckor med farligt gods*, VTI rapport 387:2, 1994 (b)

Gheorghe, A.V. et al, *Integrated Risk Assessment Transportation Dangerous Goods: Introducing Hot spot Concept as a Solution*, Safety and Reliability, Balkema, Rotterdam, 1999

Griffin, B.J., Auld, R.G., *Transportation Also Begins and Ends with Risks,* Proceedings of the First International Concensus Conference on the Risks of Transporting Dangerous Goods held in Toronto, 1992, edited by Saccomanno, F.F., Cassidy, K., Waterloo, 1993

Haimes, Y., *Risk Modelling, Assessment, and Management*, John Wiley and sons, USA, 1998

Hammar, L., Magnusson, K., *Riskstudie av farligt godstransporter på större stråk av väg och järnväg i Skåne län*, Karlstad, 2002

Harms-Ringdahl, L., *Riskanalys i MTO-perspektiv – summering av metoder för industriell tillämpning*, Statens Kärnkraftsinspektion rapport nr 96:63, Stockholm, 1996

Harms-Ringdahl, L., *Safety analysis – principles and practice in occupational sa*fety, Elsevier science publishers Ltd., England, 1993

Helmersson, L., *Konsekvensanalys av olika olycksscenarier vid transport av farligt gods på väg och järnväg*, VTI rapport 387:4, 1994

Ingvarson, J., Roos, A., *Vägledning för riskanalys*, Svenska Brandförsvarsföreningen, preliminärversion, 2002

Ingvarson, J., et al, *Förslag på fördjupad översiktsplan med riskanalys Sorgenfri industriområde*, Rapport 9191, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2002

International Atomic Energy Agency, *Evaluating the Reliability of Predictions made using Environmental Transfer Models*, Vienna, 1989

International Electrotechnical Commission, IEC, (1995-12): *International Standard – Dependability Management part 3,* Application Guide – Section 9 Risk Analysis of Technical Systems, 1995

Johansson, H., *Osäkerhetshantering av riskanalyser avseende brandskydd,* Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2000

Kaplan, S., et al, *New Tools for Failure and Risk Analysis – Anticipatory Failure Determination (AFD) and the Theory of Scenario Structuring*, Ideation International, 1999

Kemikontoret, *Integrerat ledningssystem för säkerhet, hälsa och miljö*, 1997

Kemikontoret, *Riskhantering 3 – Tekniska riskanalysmetoder*, 2001

Kirwan, B., *A Guide to practical Human Reliability Assessment*, Taylors & Francis, England, 1994.

Kjellén, U., Tinmannsvik, R.K., *SMORT-Säkerhetsanalys av industriell organisatio*n, Arbetarskyddsnämnden, 1999

Kolluru, R. et al., *Risk Assessment and Management handbook for environmental, health and safety professionals*, McGraw-Hill, Inc., USA, 1996

Lauridsen, K. et al., *Assessing Uncertainties in the Process of Risk Analysis of Chemical Establishments, Part 1 and 2,* Proceedings ESREL Conference Towards a Safer World, Torino, 2001

Leeming, D., *Assessment of the Risks of Transporting Hazardous Substances by Road and Rail – Sensitivity of the QRA model to the population Distribution,* Health and Safety Executiv, Research and Laboratory Service Division, Internal report, 1993

Lindberg, E., Morén, B., *Riskanalysmetod för transport av farligt gods på väg och järnväg – Projektsammanfattning*, VTI rapport 387:1, 1994

Mattson, B., *Riskhantering vid skydd mot olyckor – problemlösning och beslutsfattande*, Räddningsverket, Karlstad, 2000

Magnusson, S.E., et al, *Fire Safety Desig Based on Calculations. Uncertainy Analysis and Safety Verification*, Rapport 3078, Brandteknik Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1995

Morgan, G.M., & Henrion, M., *Uncertainty – Aguide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis,* Cambridge University Press, New York, 1990

Murphy, D.M., Paté-Cornell, E., *The SAM Framework: Modelling the Effects of Management Factors on Human Behavior in Risk Analysis*, Risk Analysis, Vol. 16, No. 4, pp.501-515, 1996.

Nilsson, G., *Vägtransporter med farligt gods – Farligt gods i vägtrafikolyckor*, VTI rapport 387:3, 1994

Nolan, Dennis P., *Application of HAZOP and What-if safety reviews to the petroleum, petrochemical and chemical industries*, Noyes publications, USA, 1994

Olsson, F., *Riskanalysmetoder*, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1999

Palisade Corporation, *@RISK manual*, New York, 1994

Parry, G.W., *Uncertainty in PRA and its Implications for use in Risk-Informed Decision Making*, Proceedings of the 4th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Edited by Mosleh, A. and Bari, R.A., New York, 1998

Paté-Cornell, M.E., *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment,* Reliability Engineering and System Safety no. 54, pp 95-111, Elsevier Science Limited, 1996

Paté-Cornell, M.E., Murphy, D.M, *Human and management factors in probabilistic risk analysis: the SAM approach and observations from recent applicatons*, Reliability Engineering and System Safety, vol 53, pp 115-126, 1996

Purdy, G., *Risk analysis of the transportation of dangerous goods by road and rail*, Journal of Hazardous Materials, Vol. 33, pp. 229-259, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1993

Rasmussen, J., Svedung, I., *Proaktive Risk Management in a Dynamic Society*, Räddningsverket, Sjuhäradsbygdens tryckeri, Borås, 2000

Rausand, M., *Risikoanalyse - veiledning til NS 5814*, Tapir Forlag, 1991

Redmill, F., Chudleigh, M., Catmur J., *System Safety: HAZOP and software HAZOP*, John Wiley & Sons Ltd, England, 1999

Räddningsverket, *Farligt gods – Riskbedömning vid transport, Handbok för riskbedömning av transporter med farligt gods på väg och järnväg*, 1996

Räddningsverket, *Värdering av risk*, FoU rapport, Karlstad, 1997

Skyddsavdelningen Malmö Brandkår, *Riskhanteringsmodell för etablering vid Yttre Ringvägen*, arbetsmaterial, 2000

Stockholms Brandförsvar, *Riskanalyser i detaljplaneprocessen – Utredning för Stockholms Stad*, remissutgåva, 2001

Svarvar, P., Persson, U., *Ekonomisk analys av farligtgodsolyckor vid järnvägs- och tankbilstransporter av ammoniak och bensin*, VTI rapport 387:5, 1994

Svensk författningssamling 1998:808, *Miljöbalken*

Svensk författningssamling 1999:381, *Lag om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor*

Svensk författningssamling 2002:472, *Förordning om åtgärder för fredstida krishantering och höjd beredskap*

Svensk författningssamling 2002:518, *Förordning med instruktion för Krisberedskapsmyndigheten*

Taylor, J.R., *Risk Analysis for Process Plant, Pipeline and Transport*, E & FN Spon, 1993

Tixier, J. et al, *Rewiew of 62 risk analysis methodologies of industrial plans*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 15, 291-303, 2002

Uijt de Haag et al, *Guideline for quantitative risk assessment: Instructions for a quantitative risk analysis in the Netherlands,* National Institute of Public Health and the environment, Safety and Reliability, Balkema Rotterdam, 1999

US Department of Defense, *Procedures for performing a failure mode and effects analysis*, MIL-STD-1629A, 1977

Vose, D., *Risk Analysis – A Quantitative Guide,* 2:nd edition, John Wiley & Sons Ltd., Chicester, 2000

10.2 Elektroniska källor

Banverkets hemsida, www.banverket.se, hämtat från World Wide Webb 2002-10-23

Krisberedskapsmyndighetens hemsida, www. krisberedskapsmyndigheten.se, hämtat från World Wide Webb 2002-11-18

10.3 Muntliga källor

Davidsson, G., Det Norske Veritas, framträdande vid Länsstyrelsen i Värmlands läns seminarium, Karlstad, 2002-05-29

Jacobsson, A., adj. lektor vid Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, framträdande vid LTH:s seminarium ”Framtidens riskhantering”, 2002-11-08

Petersen, K., adj. professor vid Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, möte 2002-10-23

Postgård, U., projektansvarig FarGo, Räddningsverket, telefonkontakt 2002-10-28

11 Förteckning över bilagor

Bilaga 1. VTI-metoden
Bilaga 2. Beräkning av spridning vid gasutsläpp
Bilaga 3. Individriskberäkningar
Bilaga 4. Samhällsriskberäkningar

Bilaga 1. VTI-metoden

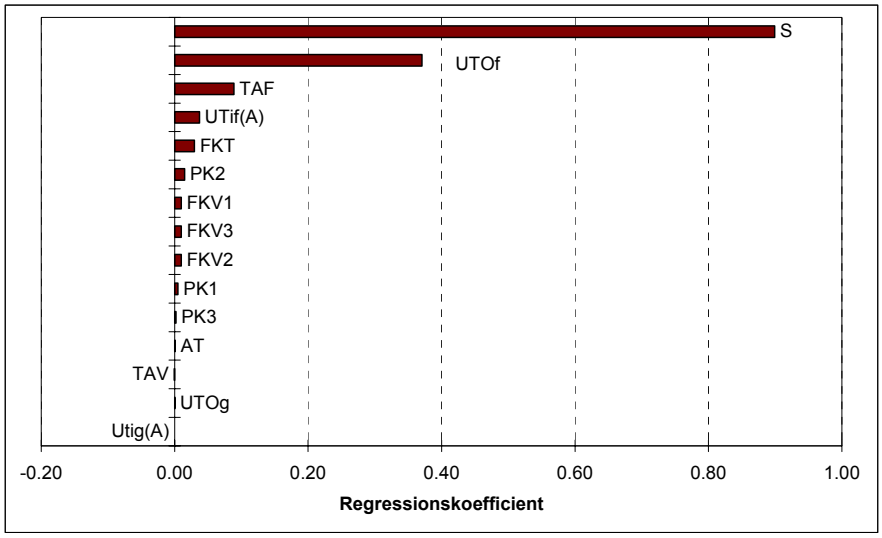
Ursprungligen används fördelningar med stora variationer för samtliga ingående parametrar vid framtagandet av tornadografer med hjälp av programmet @RISK. Dock blir resultaten mycket varierande vid olika simuleringar vilket tyder på begränsningar i datorprogrammet. För att komma runt detta problem används istället fördelningar med så små variationer att parametrarnas fördelningar i praktiken utgörs av ett enskilt värde. Dessa anges tillsammans med erhållna tornadografer nedan. Vid simuleringarna har 1000 iterationer gjorts med s.k. Latin Hypercube Sampling (se avsnitt 3.3.4). För mer information om samplingsmetoden hänvisas till[158].

Järnväg

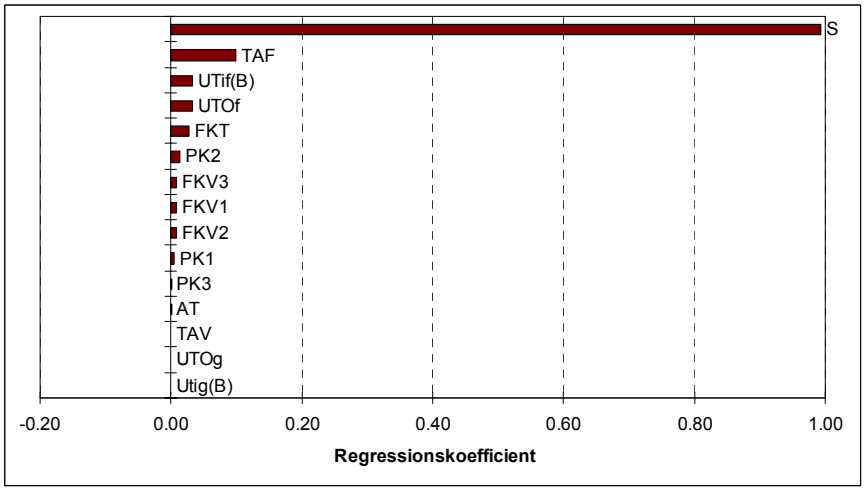
Tabell 1.1. Ingående parametrars fördelningar vid känslighetsanalys i @RISK.

Parameter	*Ursrungs-värden*	*Fördelningar i @RISK*
S	2	RiskUniform(1.999,2.001)
TAF	20	RiskUniform(19.999,20.001)
TAV	75	RiskUniform(74.999,75.001)
UTif(A)	8.00E-10	RiskUniform(0.0000000007999,0.00000000080001)
UTif(B)	1.90E-09	RiskUniform(0.0000000018999,0.0000000019001)
UTif (C)	5.50E-09	RiskUniform(0.0000000054999,0.0000000055001)
UTif(D)	7.30E-09	RiskUniform(0.0000000072999,0.0000000073001)
Utig(A)	1.80E-09	RiskUniform(0.0000000017999,0.0000000018001)
Utig(B)	4.30E-09	RiskUniform(0.0000000042999,0.0000000043001)
Utig (C)	1.26E-08	RiskUniform(0.0000000125999,0.0000000126001)
Utig(D)	1.67E-08	RiskUniform(0.0000000166999,0.0000000167001)
UTOf	4.00E-09	RiskUniform(0.0000000042999,0.0000000043001)
UTOg	8.70E-09	RiskUniform(0.000000008699,0.000000008701)
FKT	6.00E-08	RiskUniform(0.0000000599,0.0000000601)
FKV1	5.00E-08	RiskUniform(0.0000000499,0.0000000501)
FKV2	1.50E-07	RiskUniform(0.0000001499,0.0000001501)
FKV3	2.00E-08	RiskUniform(0.0000000199,0.0000000201)
PK1	1	RiskUniform(0.999,1.001)
PK2	1	RiskUniform(0.999,1.001)
PK3	1	RiskUniform(0.999,1.001)
AT	2200	RiskUniform(2199.999,2200.001)

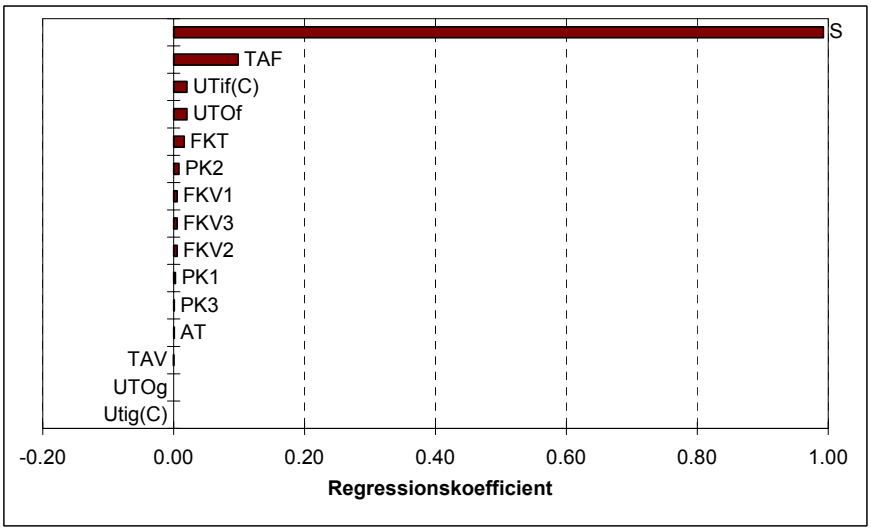
[158] Magnusson, S.E., et al, 1995



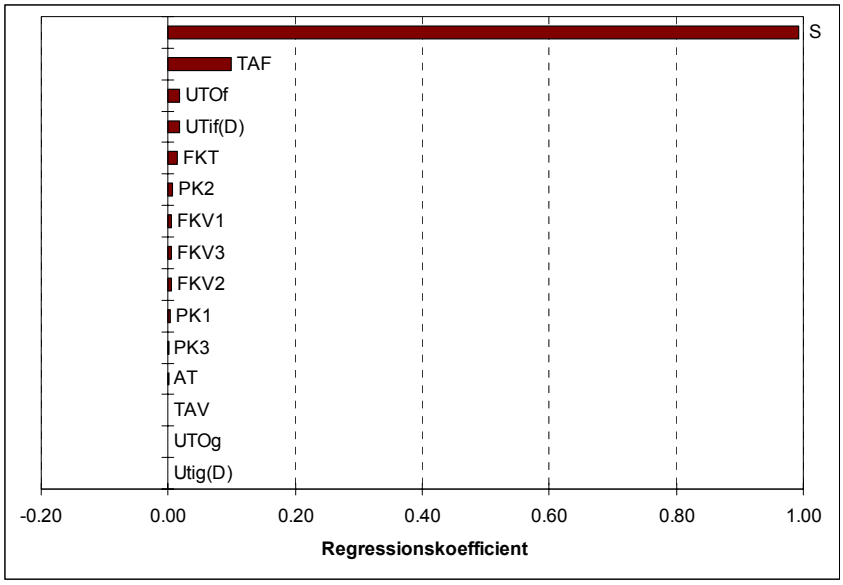
Figur 1.1. Spårkvalitet A, regressionskoefficient vid beräkning av F1+F2+F3.



Figur 1.2. Spårkvalitet B, regressionskoefficient vid beräkning av F1+F2+F3.



Figur 1.3. Spårkvalitet C, regressionskoefficient vid beräkning av F1+F2+F3.

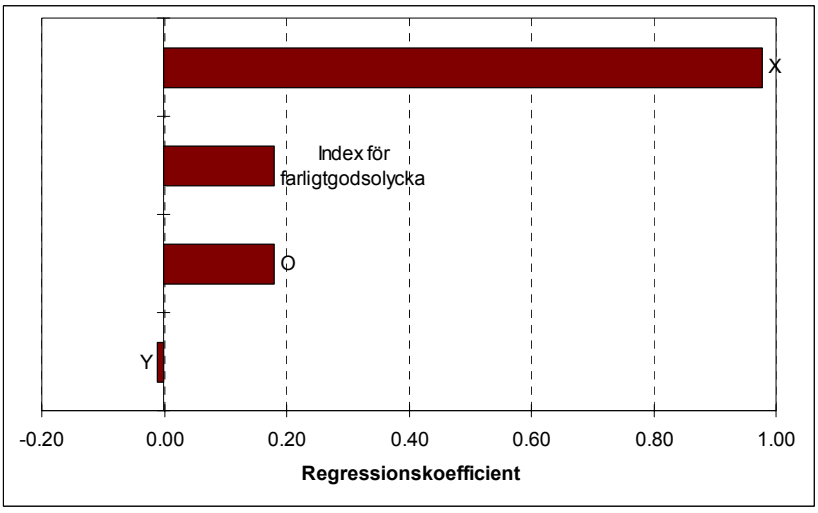


Figur 1.4. Spårkvalitet D, regressionskoefficient vid beräkning av F1+F2+F3.

Väg

Tabell 1.2.

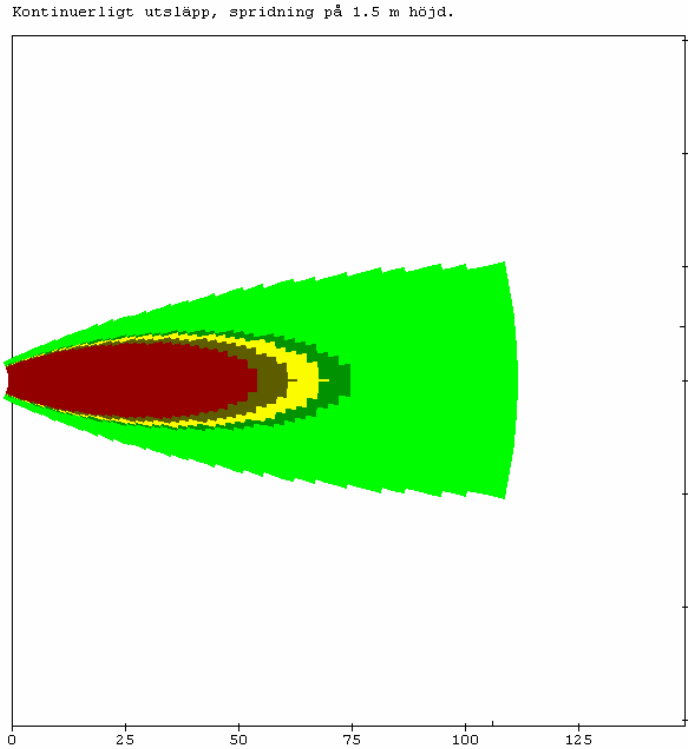
Parameter	*Ursprungsvärden*	*Fördelningar i @RISK*
O	11	RiskUniform(10.999,11.001)
X	0,02	RiskUniform(0.01999,0.02001)
Y	0,24	RiskUniform(0.23999,0.24001)
I	0,11	RiskUniform(0.10999,0.11001)



Figur 1.5. Regressionskoefficient vid transport av farligt gods på väg.

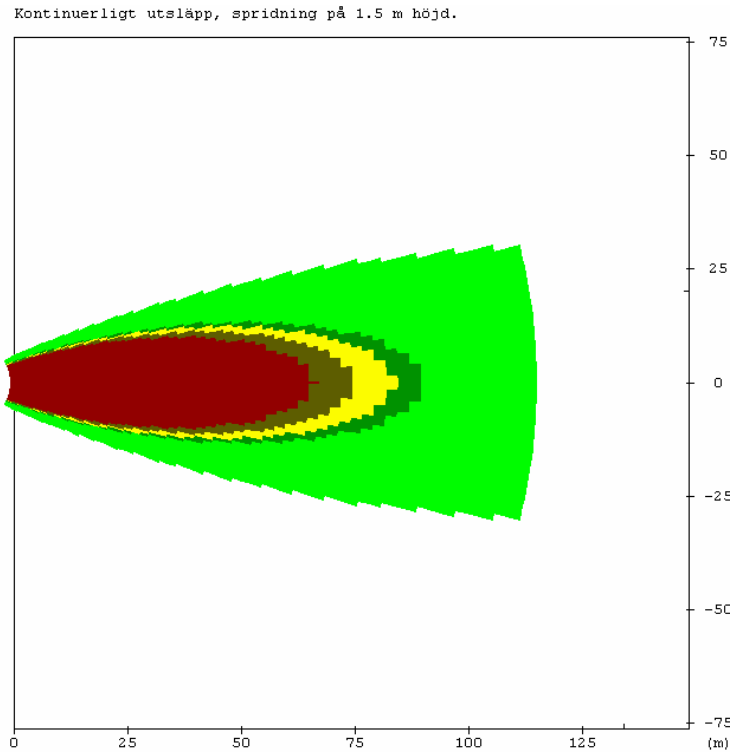
Bilaga 2. Beräkning av spridning vid gasutsläpp.

Beräkning av spridning av ammoniak för bestämning av individrisk görs med hjälp av datorprogrammet Beräkningsmodell för Kemikalieexponering (BfK). En omfattande beskrivning av modellen inklusive begränsningar och fördelar med modellen finns beskriven i ett flertal rapporter[159,160]. Den beräknade spridningen av gasen redovisas i Figur 2.1 till Figur nedan. I figurerna illustreras koncentrationen av ammoniak på olika avstånd från utsläppskällan till vänster i figurerna. De olika ringarna utgör de gränser vid vilka koncentrationen av gas uppgår till 8558, 6894, 5760, 5000 respektive 1000 ppm.

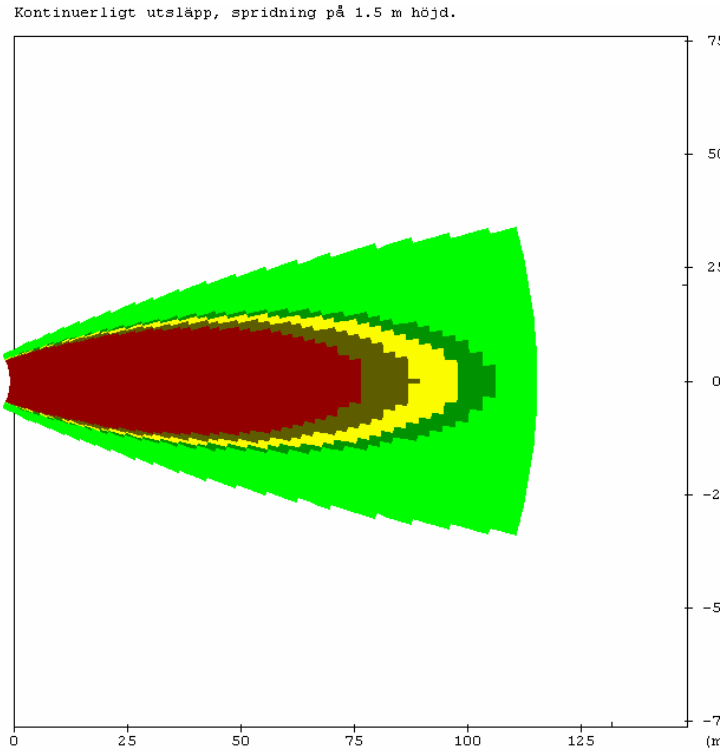


Figur 2.1. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 8,8 kg/s.

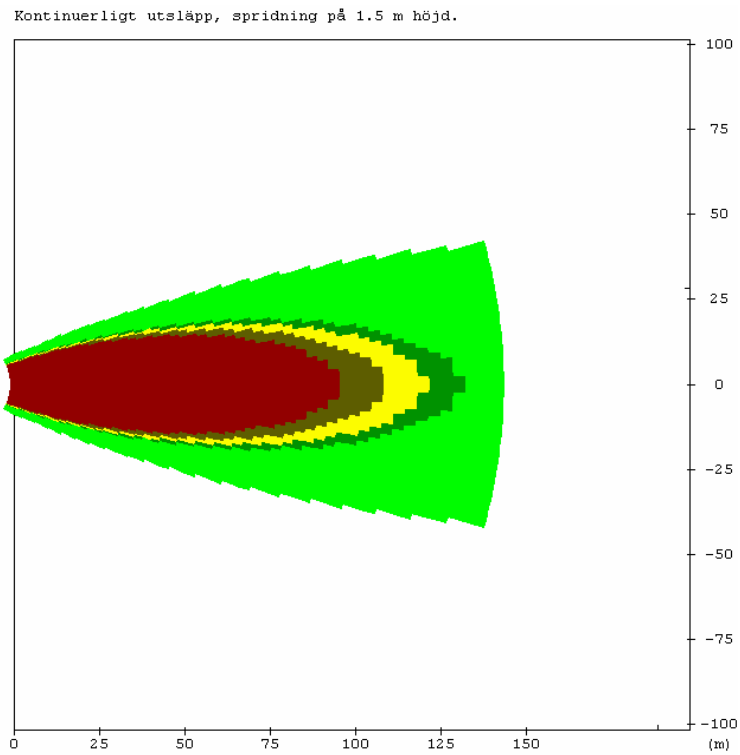
[159] Ingvarson, J., et al, 2002
[160] Bergfeldt, M., et al, 2002



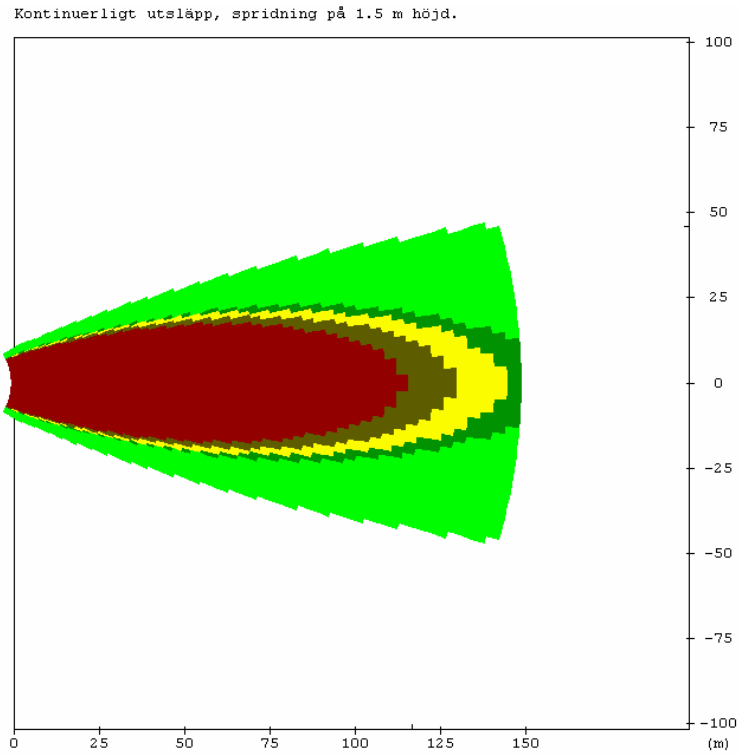
Figur 2.2. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 13 kg/s.



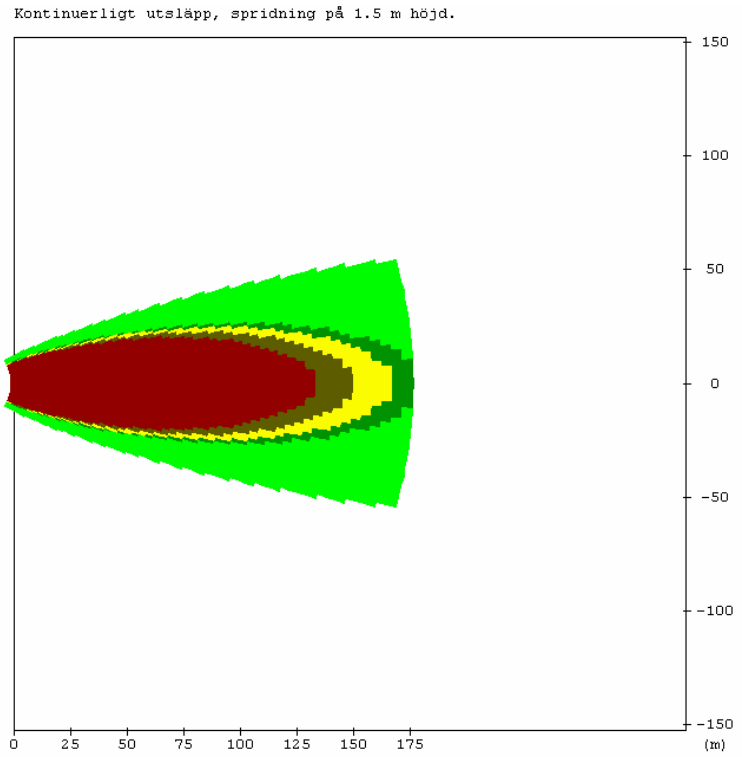
Figur 2.3. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 18 kg/s.



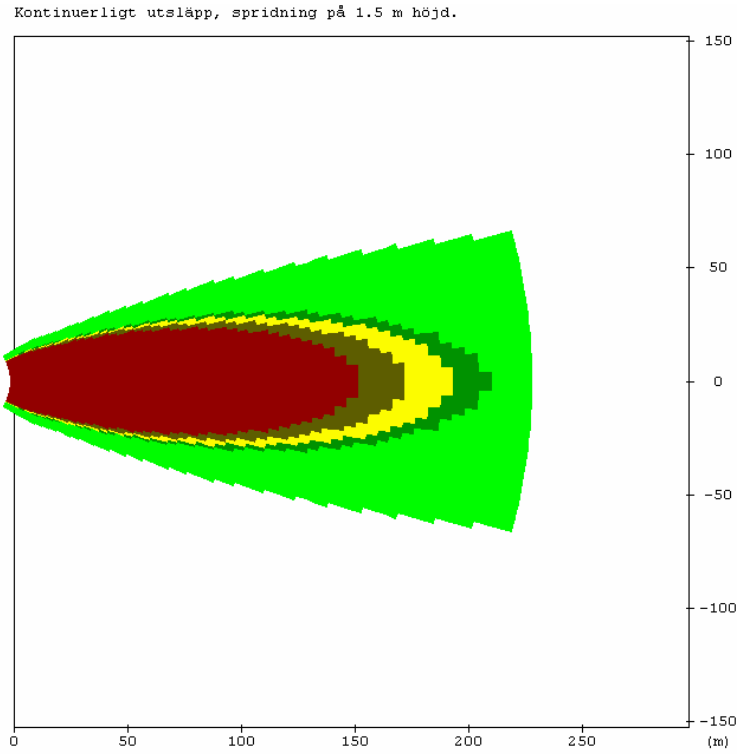
Figur 2.4. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 26 kg/s.



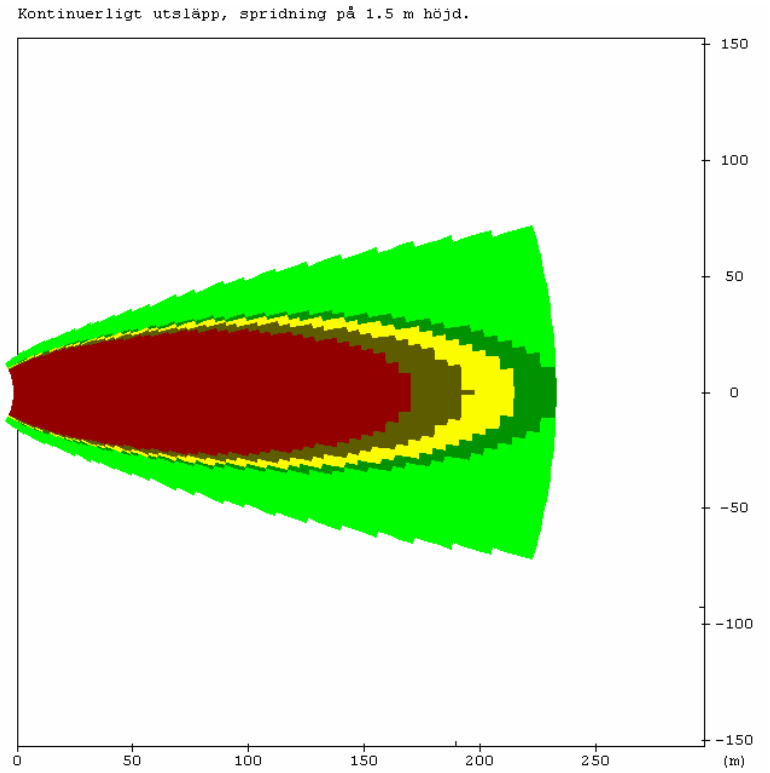
Figur 2.5. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 36 kg/s.



Figur 2.6. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 48 kg/s.



Figur 2.7. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 62 kg/s.



Figur 2.8. Utsläpp av ammoniak enligt BfK, utsläppsstorlek 77 kg/s.

De olika figurerna representerar olika scenarier med olika utsläppsmängd. En sammanställning av resultatet av BfK-simuleringarna återfinns i Tabell 2.1.

Tabell. 2.1. Sammanställning av simuleringarna i BfK

Scenario	Utsläppsstorlek (kg/s)	Avstånd i m från utsläppskällan till 5760 ppm (längd respektive bredd)		Avstånd i m från utsläppskällan till 6894 ppm (längd respektive bredd)		Avstånd i m från utsläppskällan till 8558 ppm (längd respektive bredd)	
1	8,8	69	10	62	9	54	8
2	13	84	12	74	11	66	9
3	18	97	15	88	13	76	11
4	26	121	18	107	16	95	15
5	36	143	21	129	19	114	17
6	48	167	25	149	23	133	20
7	62	193	29	171	26	152	24
8	77	214	33	196	30	170	26

Bilaga 3. Individriskberäkningar

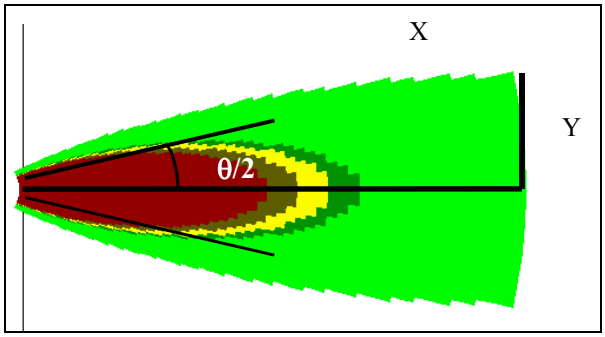
Frekvensen beräknas enligt formeln:

$f_{i,d} = f_i * (\theta/360)$

Spridningsvinkeln beräknas med utgångspunkt från spridningsberäkningarna som

$\tan \theta/2 = Y/X$

i Figur 3.1.



Figur 3.1. Förenkling för beräkning av spridningsvinkel (θ).

Spridningsvinkel, avståndet till LC_{50}-värdet och frekvensen för samtliga scenarier redovisas i **Fel! Hittar inte referenskälla.**.1, Tabell 3.2. och Tabell 3.3.

Tabell 3.1. Sammanställning av data för beräkning av individrisk vid LC_{50} = 5760 ppm.

Scenario	Avstånd X	Avstånd Y	Spridningsvinkel (θ)	Frekvens f_i	Frekvens $f_{i,d}$
1	69	10	16.49	7.30E-03	0.000334381
2	84	12	16.26	7.30E-04	3.29717E-05
3	97	15	17.58	2.20E-04	1.07433E-05
4	121	18	16.92	5.50E-05	0.000002585
5	143	21	16.71	1.10E-06	5.10583E-08
6	167	25	17.03	3.80E-07	1.79761E-08
7	193	29	17.09	1.20E-08	5.69667E-10
8	214	33	17.53	6.20E-09	3.01906E-10

Tabell 3.2. Sammanställning av data för beräkning av individrisk vid LC_{50} = 6894 ppm.

Scenario	Avstånd X	Avstånd Y	Spridningsvinkel (θ)	Frekvens f_i	Frekvens $f_{i,d}$
1	62	9	16.52	7.30E-03	0.000334989
2	74	11	16.91	7.30E-04	3.42897E-05
3	88	13	16.81	2.20E-04	1.02728E-05
4	107	16	17.01	5.50E-05	2.59875E-06
5	129	19	16.76	1.10E-06	5.12111E-08
6	149	23	17.55	3.80E-07	1.8525E-08
7	171	26	17.29	1.20E-08	5.76333E-10
8	196	30	17.4	6.20E-09	2.99667E-10

Tabell 3.3. Sammanställning av data för beräkning av individrisk vid LC_{50} = 8558 ppm.

Scenario	*Avstånd X*	*Avstånd Y*	*Spridningsvinkel (θ)*	*Frekvens f_i*	*Frekvens $f_{i,d}$*
1	54	8	16.85	7.30E-03	0.000341681
2	66	9	15.53	7.30E-04	3.14914E-05
3	76	11	16.47	2.20E-04	0.000010065
4	95	15	17.95	5.50E-05	2.74236E-06
5	114	17	16.96	1.10E-06	5.18222E-08
6	133	20	17.1	3.80E-07	1.805E-08
7	152	24	17.95	1.20E-08	5.98333E-10
8	170	26	17.39	6.20E-09	2.99494E-10

Bilaga 4. Samhällsriskberäkningar

För att analysera hur samhällsrisken påverkas av variationer i indata varieras parametrarna skadekriterium, spridningsvinkel och befolkningstäthet var för sig. Resultatet presenteras i form av redovisande F/N-diagram där de olika variationerna som ger upphov till olika kurvor åskådliggörs i samma diagram. De kummulativa frekvenserna är fiktiva och konstanta.

Tabell 4.1. Indata till F/N-diagram för variationer i befolkningstäthet. Not. * B = befolkningstäthet Personer per km^2.

Scenario	*Kummulativ frekvens*	*Avstånd (r) i meter*	*Spridnings-vinkel (θ)*	*Antal döda vid B* = 100*	*Antal döda vid B*= 2500*	*Antal döda vid B*= 12000*
1	7.30E-03	62	15	≤ 1	1.26	6.04
2	7.30E-04	74	15	≤ 1	1.79	8.60
3	2.20E-04	88	15	≤ 1	2.53	12.16
4	5.50E-05	107	15	≤ 1	3.75	17.98
5	1.10E-06	129	15	≤ 1	5.45	26.14
6	3.80E-07	149	15	≤ 1	7.27	34.87
7	1.20E-08	171	15	≤ 1	9.57	45.93
8	6.20E-09	196	15	≤ 1	12.57	60.34

Tabell 4.2. Indata till F/N-diagram för variationer av spridningsvinkeln (θ).

Scenario	*Kummulativ frekvens*	*Avstånd (r) i meter*	*Befolknings-täthet pers/km²*	*Antal döda vid θ = 5°*	*Antal döda vid θ= 15°*	*Antal döda vid θ= 50°*
1	7.30E-03	62	2500	≤ 1	1.26	4.19
2	7.30E-04	74	2500	≤ 1	1.79	5.97
3	2.20E-04	88	2500	≤ 1	2.53	8.45
4	5.50E-05	107	2500	≤ 1	3.75	12.49
5	1.10E-06	129	2500	≤ 1	5.45	18.15
6	3.80E-07	149	2500	1.25	7.27	24.22
7	1.20E-08	171	2500	1.82	9.57	31.90
8	6.20E-09	196	2500	2.42	12.57	41.91

Tabell 4.3. Indata till F/N-diagram för variationer av LC50-värdet och därmed avståndet (r).

Scenario	*Kummulativ frekvens*	*Spridnings vinkel (θ)*	*Befolknings-täthet pers/km²*	*Antal döda då LC_{50} = 5760 ppm*	*Antal döda då LC_{50} = 6894 ppm*	*Antal döda då LC_{50} = 8558 ppm*
1	7.30E-03	15	2500	1.56	1.26	1
2	7.30E-04	15	2500	2.31	1.79	1.43
3	2.20E-04	15	2500	3.08	2.53	1.89
4	5.50E-05	15	2500	4.79	3.75	2.95
5	1.10E-06	15	2500	6.69	5.45	4.25
6	3.80E-07	15	2500	9.13	7.27	5.79
7	1.20E-08	15	2500	12.19	9.57	7.56
8	6.20E-09	15	2500	14.99	12.57	9.46