

# Hur noggrannhetsgraden påverkar resultaten i kvantitativa riskanalyser gällande olycksutsläpp

---

JOEL DAHLQUIST |

AVDELNINGEN FÖR BRANDTEKNIK |

LTH | LUNDS UNIVERSITET |



**Hur noggrannhetsgraden påverkar resultaten i  
kvantitativa riskanalyser gällande olycksutsläpp**

**Joel Dahlquist**

**Lund 2022**

Titel: Hur noggrannhetsgraden påverkar resultaten i kvantitativa riskanalyser gällande olycksutsläpp.

Title: How the level of accuracy affects the results in quantitative risk analysis regarding accident dispersion.

Författare/Author: Joel Dahlquist

**Report 5666**

**ISRN: LUTVDG/TVBB--5666--SE**

Antal sidor/Number of pages: 69

Illustrationer: Om inget annat anges kommer illustrationerna från författaren.

Illustrations: If nothing else is specified, the following illustrations come from the author.

**Sökord:**

Kvantitativ riskanalys, noggrannhet, scenario, sannolikhet, konsekvens, parameter, riskmått, sannolikhetsfördelning, känslighet

**Keywords:**

Quantitative risk analysis, accuracy, scenario, probability, consequence, parameter, risk measure, probability distribution, sensitivity

**Abstract**

QRA (quantitative risk analysis) is a methodology to calculate risks. A question is how much input data's accuracies and precisions affect the results in a QRA? There are qualitative descriptions in this area but not calculated examples in the same extent. This study tries to figure out quantitatively if more scenarios and precisions lead to more accurate results, which parameters that affect the results the most and the stage where the results will be less changeable. The case study shows the difficulty in QRA to calculate if more scenarios with more refined distributions lead to a more accurate result regarding convergence criterion. It seems that the parameters time period (with population densities) and wind direction have most influence on the outcome. Perhaps a scenario count between 16-144 from one accident event, with more focus on the parameters time period and wind direction, can be reasonable for stable results. There are indications in the study that 4-8 wind directions are satisfying.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2022

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2022.

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telefon: 046 - 222 73 60

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

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telephone: +46 46 222 73 60

## Sammanfattning

Syftet med rapporten är att undersöka hur antalet scenarier och noggrannheter (antalet värden från fördelningar) påverkar resultatet i kvantitativ riskanalys när det kommer till olycksutsläpp. Dessutom är syftet att undersöka vilka parametrar som påverkar resultatet mest beroende på noggrannhetsnivån. Slutligen är syftet att undersöka när ökad noggrannhet får mindre betydelse.

Litteraturstudier genomfördes för att kartlägga kunskap inom området för kvantitativ riskanalys gällande noggrannhet. Efter konstaterades att forskningen är begränsad i detta sammanhang och att det kan finnas behov av att fördjupa kunskaperna inom området.

En kvantitativ riskanalys med en ammoniakanläggning i Skärhamn används till undersökningen för att ge underlag för att studera syftet. Totalt utförs två olika typer av undersökningar där riskmått används till jämförelse för att besvara syftet. Riskmått som tillämpas är genomsnittlig dödlighet, maximal dödlighet kopplat till scenario och medeldifferens av frekvens relativt en referenslinje. I den första undersökningen utökas antalet scenarier successivt från en låg noggrannhetsnivå till en hög för att avgöra om fler scenarier med utökade noggrannheter leder till ett träffsäkrare resultat. I den andra undersökningen hölls alla parametrars noggrannheter på den högsta nivån förutom en vars noggrannhet trappas upp gradvis. Detta görs för samtliga utvalda parametrar för att undersöka om det finns extra känsliga parametrar vars approximationer påverkar resultatet mest. Parametrar som undersöks var tidsperiod (med populationstätheter), temperatur, vindriktning och vindstyrka där alla tilldelas sannolikhetsfördelningar. Båda undersökningarna används sedan till att försöka avgöra vid vilket skede resultatet inte påverkas nämnvärt i takt med utökad noggrannhet.

Resultatet visar att det i en kvantitativ riskanalys är svårt att beräkningsmässigt bedöma om fler scenarier med utökade noggrannheter leder fram till ett träffsäkrare resultat med hjälp av konvergenskriterium. Däremot verkar resultatet bli träffsäkrare avseende att resultatet ändras mindre i takt med fler scenarier. Det verkar som att parametrarna tidsperiod (med populationstätheter) och vindriktning påverkar resultatet i störst omfattning i fallstudien. Av resultatet verkar det som att minst 16-144 scenarier från ett skadefall, med fokus på indelningarna för tidsperiod och vindriktning, är rimligt för att inte resultatet ska ändras markant. Under förutsättningen att alla omgivande parametrar hålls konstanta på en skaplig nivå finns det indikationer på i fallstudien att minst 4-8 vindriktningar är någorlunda tillräckligt för att resultatet inte ska ändras mycket. Det konstateras också att mer forskning behöver göras på andra fall för att kontrollera resultatet.

## Summary

The purpose of the report is to examine how the magnitude of scenarios and accuracies affect the results in quantitative risk analysis regarding accident dispersions. Furthermore, the purpose is to examine which parameters that are more prone to affect the result. Finally, the purpose is to figure out when increased accuracy has less impact.

Literature studies were conducted in order to map knowledge within this subject of quantitative risk analysis and approximations. Afterwards it seemed that the research in this topic is restricted, and that more knowledge may be needed.

A quantitative risk analysis with an ammonia facility in Skärhamn were used as a foundation for the examination. Two different kinds of studies were conducted where several risk measures were applied. The risk measures consisted of average rate of death, maximum risk contribution and the average difference of frequency in relation to a reference line. In the first study the scenarios were increased step by step from a low level of accuracy to a high level to determine if more scenarios with refined distributions lead to a more accurate result. In the second study, all the parameter's distributions were set to the highest level of accuracy except from one parameter that incrementally stepped up in accuracy. All the parameters went through this procedure to conclude if there are any parameter that are more sensible than others when it comes to affect the result. The examined parameters were time period (with population densities), temperature, wind direction and wind strength. All the parameters were assigned with probability distribution in some way. The two studies were finally used to consider the stage where the results do not distinctively change anymore with added precision.

The result shows the difficulty in quantitative risk analysis to calculate if more scenarios with more refined distributions lead to a more accurate result regarding convergence criterion. On the other hand, there are indications that the result change less with more scenarios. It seems that the parameters time period (with population densities) and wind direction have the most influence on the outcome. Perhaps a scenario count of at least 16-144 from one accident event, with more focus on the parameters time period and wind direction, could be reasonable for stable results. Under the conditions that the surrounding parameters are distributed in a decent level there are indications in the study that at least 4-8 wind directions are enough to have a relatively low change in the outcome. Finally, it is concluded that more research is needed in other cases to control the results in this report.

## Förord

Följande rapport är ett examensarbete som gäller för programmen brandingenjör och civilingenjör i riskhantering. Programmen undervisas på Lunds Tekniska Högskola. I rapporten valdes ett ämne vars huvudsakliga ändamål är att tillämpa förvärvade kunskaper från studerade program. Innehållet skrevs vårterminen 2022 och täcker 30 högskolepoäng i kursen VBRM10. Fastän rapporten är skriven på egen hand erhöles stöd och inspiration från olika håll. Därför kommer nedanstående personer att tackas.

### **Håkan Frantzich**

Handledare för examensarbetet och universitetslektor inom brandteknik. *Tack för all handledning och värdefulla kommentarer.*

### **Henrik Hassel**

Undervisare i kursen Riskanalys inom säkerhetsområdet. *Tack för en väl genomförd kurs med massiv av inspiration.*

*Lund 2022*

*Joel Dahlquist*

## **Ansvarsfriskrivning**

Rapporten är ett examensarbete skriven i slutet av utbildningen med det huvudsakliga syftet att tillämpa kunskaper och visa förmåga på självständigt arbete som civilingenjör. Innehållet är inte granskat i vidare utsträckning för att vara kvalitetssäkrat. Den som i något sammanhang tillämpar eller hänvisar till innehållet bär själv ansvaret.

## Symbolista

$P_0$	Tryck inuti behållare [ $N/m^2$ ]
$\gamma$	Poissons kvot [—]
$P_a$	Atmosfärstryck [ $N/m^2$ ]
$Q$	Källans massflöde [ $kg/s$ ]
$C_d$	Kontraktionsfaktor [—]
$A$	Hålets tvärsnittsarea [ $m^2$ ]
$R$	Gaskonstant [ $J/kg \cdot K$ ]
$T_0$	Temperatur inuti behållare [ $K$ ]
$P_e$	Tryck vid utlopp [ $N/m^2$ ]
$R_*$	Universell gaskonstant [ $J/kmol \cdot K$ ]
$m$	Molvikt [ $kg/kmol$ ]
$T_e$	Temperaturen i utloppet [ $K$ ]
$u_e$	Hastighet för utflöde [ $m/s$ ]
$F$	Rörelsemängdflöde [ $N$ ]
$A_e$	Tvärsnittsarea för utloppet [ $m^2$ ]
$Y_c$	Koncentrationen i centrum för cirkulär jet [ $kg/kg$ ]
$\rho_a$	Atmosfärnsdensiteten [ $kg/m^3$ ]
$u_w$	Hastigheten för vinden [ $m/s$ ]
$x$	Avståndet längs med jetaxel från källan [ $m$ ]
$R$	Blandningszonens radie [ $m$ ]



# Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Mål.....	2
1.4 Frågeställningar .....	2
1.5 Avgränsningar .....	2
1.6 Begränsningar.....	2
2 Metod .....	3
2.1 Litteraturstudier .....	4
2.2 Analysmodellen .....	4
3 Litteraturstudier .....	5
3.1 Sökmetodik.....	5
3.2 Kvantitativ riskanalys.....	6
3.3 Presentation av risk.....	9
3.3.1 Samhällsrisk.....	9
3.3.2 Genomsnittlig dödlighet.....	10
3.3.3 Riskvärdering.....	10
3.3.4 Individrisk .....	10
3.4 Utmaningar i QRA.....	11
3.4.1 Antaganden och begränsningar .....	11
3.4.2 Modeller .....	11
3.4.3 Osäkerheter .....	11
3.4.4 Robusthet .....	12
3.4.5 Riskvalidering.....	12
3.4.6 Datorisering .....	13
3.5 Övrigt.....	13
3.5.1 Ammoniaks egenskaper .....	13
3.5.2 Visual Basic for Applications.....	13
4 Analysmodellen .....	14
4.1 Undersökningsmetodiker .....	14
4.1.1 Successivt utökat antal scenarier .....	14
4.1.2 Parameterkänslighet .....	15
4.1.3 Riskmått för jämförelse av noggrannhet.....	15
4.2 Definition av olycksscenarier.....	16

4.3 Uppskattning av olycksfrekvenser.....	17
4.3.1 Tidsperiod.....	17
4.3.2 Temperatur.....	18
4.3.3 Vindriktning.....	18
4.3.4 Vindstyrka.....	19
4.4 Utvärdering av händelsekonsekvenser .....	19
4.4.1 Modellkedja för dispersion.....	19
4.4.2 Gasutströmning.....	20
4.4.3 Fri cirkulär jet i medvind.....	21
4.4.4 Händelsekonsekvenser.....	23
5 Resultat.....	29
5.1 Successivt utökat antal scenarier .....	29
5.2 Parameterkänslighet .....	35
5.2.1 Tidsperiod.....	35
5.2.2 Temperatur.....	38
5.2.3 Vindriktning .....	43
5.2.4 Vindstyrka.....	48
6. Diskussion.....	53
6.1 Analys av resultatets träffsäkerhet .....	53
6.2 Analys av vilka parametrar som påverkar resultatet mest .....	53
6.3 Analys av skede varvid resultatet påverkas mindre .....	54
6.4 Modell för konsekvensberäkningar.....	54
6.5 Allmänna reflektioner.....	55
7. Slutsatser .....	57
8. Referenser .....	58
Bilaga .....	59

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Pasman, Jung, Prem, Rogers & Yang (2009) beskriver att det finns ekonomiska skäl till att processindustrier placeras i befolkade områden. De förklarar att verksamheter kan exempelvis ha olika behov av energi, produkter, arbetskraft och råvaror med mera, vilket gör att det kan vara fördelaktigt att ha lokalisering i anslutning till städer. Dock förklarar författarna att det finns verksamheter som hanterar farligt material som kan vara skadligt för människa, miljö och objekt. Vidare beskriver Pasman et al. (2009) att industrialiseringen har ökat sedan flera årtionden tillbaka och olyckor har varit ett faktum, där både invånare och arbetare kan vara utsatta för risk. Författarna hävdar att det har utvecklats flertalet riskanalysmetoder för att kartlägga och hantera risker med resultatet att riskernas omfattning minskades. Dessutom poängterar de att riskanalyser kan genomföras i olika nivåer av detaljrikedom där de minsta förklaras som kvalitativa genom att rangordna risker. Dessutom förklarar Pasman et al. (2009) att mer sofistikerade metodiker har utformats och en av dem är kvantitativ riskanalys som ibland är nödvändig att använda för att kartlägga komplexare samhällsrisker utanför industrin.

Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att det tidigare i den kemiska processindustrin användes mestadels erfarenhet för att hantera riskerna i verksamhetens aktiviteter. I dagens läge förklarar författarna att tekniken är alltmer avancerad och därför krävs ett annat relevant tillvägagångssätt för att hantera riskerna. Således påstår Arendt och Lorenzo (2000) att det har utvecklats nya riskmetoder, exempelvis QRA (quantitative risk analysis) som tillämpas bland annat inom kärnkraftverk, flygplansbranschen, militären och kemisk processindustri etcetera. Vidare förklarar de att kvantitativ riskanalys skiljer sig från andra metodiker genom att den inte använder fixa värden utan probabilistiska variabler. Författarna beskriver att metodiken involverar sannolikheter och konsekvenser i sammanhanget. En QRA används alltmer i samhället och är ett verktyg för att förbättra säkerheten (Arendt & Lorenzo, 2000).

Center For Chemical Process Safety (2000) förklarar att en CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis) är en metod för att utvärdera säkerheten i processindustrier, exempelvis i industrier som hanterar kemikalier eller giftiga ämnen som kan spridas ut bland allmänheten. CCPS (2000) beskriver vidare att en CPQRA börjar med att potentiella olycksscenarier definieras och därefter uppskattas olycksfrekvenserna samt utvärderas händelsekonsekvenserna. I nästkommande steg sker följande enligt CCPS (2000): händelseeffekter uppskattas, risken uppskattas och risken utvärderas. Grunden är att flertalet scenarier beräknas som innehåller både frekvens och konsekvens, vilket kan illustreras i ett händelsetråd (CCPS, 2000).

Litteraturstudien visar att det kvalitativt finns beskrivet hur antaganden och noggrannheter påverkar resultaten i en QRA. Däremot hittas inte lika mycket kvantitativa/beräkningsmässiga beskrivningar hur graden av noggrannhet påverkar resultaten. Därför kan vara relevant att kvantitativt fastställa hur antalet scenarier påverkar det slutgiltiga resultatet och vilken noggrannhetsgrad som är tillräcklig för en god QRA. I sammanhanget kan det även vara befogat att ha vetskap om vilka parametrar som påverkar resultatet mest. Detta för att få kunskap om hur noggrann man behöver vara i kvantitativa riskanalyser för att i slutändan erhålla ett tillförlitligt resultat.

## 1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka hur antalet scenarier påverkar resultatet i en kvantitativ riskanalys när det kommer till olycksutsläpp. Vidare är syftet att undersöka vilka parametrar som påverkar resultatet mest beroende på noggrannhetsnivån. Slutligen är syftet att undersöka när ökad noggrannhet får mindre betydelse.

## 1.3 Mål

Målet med studien är att kvantitativt beräkna resultat med riskmåttens genomsnittlig dödlighet, maximalt riskbidrag och medeldifferens av frekvens i FN-kurvor, där noggrannheterna successivt blir finare i konsekvensberäkningarna. Vidare är målet att försöka kvantifiera skillnader i riskmåttens genom jämförelse mellan olika nivåer av noggrannheter för att besvara syftet.

## 1.4 Frågeställningar

Rapporten försöker besvara frågeställningarna:

- Leder fler scenarier med utökade noggrannheter fram till ett träffsäkrare resultat?
- Vilka parametrar påverkar resultaten mest?
- Vid vilket skede påverkas inte resultatet nämnvärt i takt med utökad noggrannhet?

## 1.5 Avgränsningar

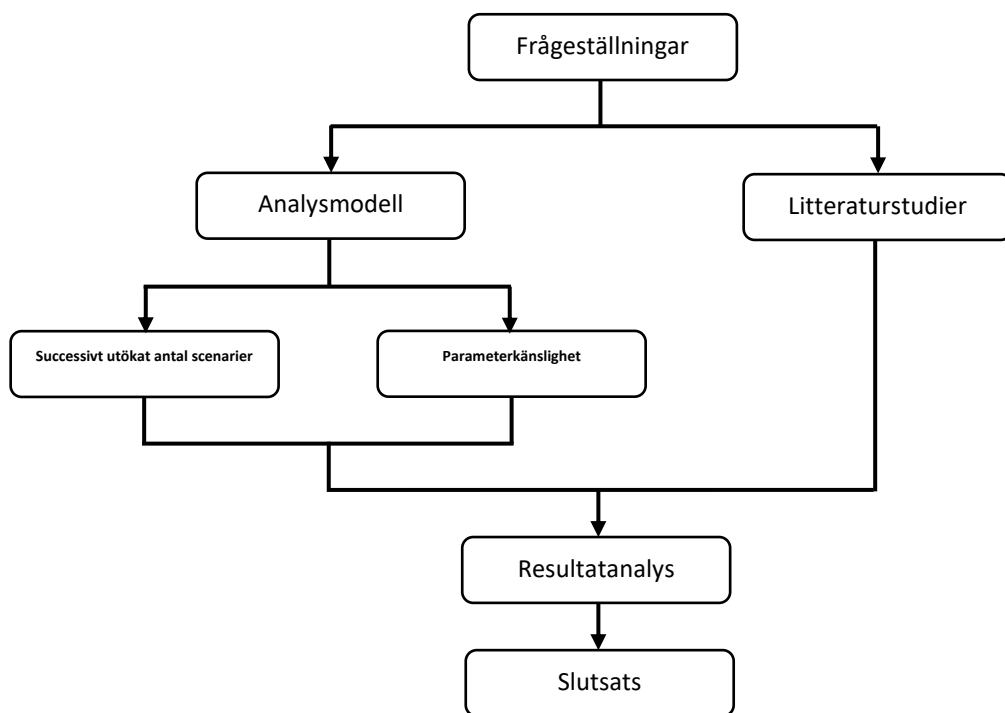
För att avgränsa studien väljs det att bara beakta en typ av spridningsmodell. Undersökningen kommer inte att ha efterföljande modeller för atmosfärsspridning. Endast ammoniak modelleras som utsläppsämne och koncentrationer som beräknas till följd av utsläppet gäller för marknivå. Dessutom görs avgränsningen att analysera parametrar kopplade till tid, population, temperatur, vindriktning och vindstyrka. En annan avgränsning är att fördelningarna för parametrarna kommer att delas in i sex nivåer av noggrannheter. Vidare gäller att konsekvenserna endast avses för dödlighet på människor vid en specifik koncentration. Ingen hänsyn tas till ekonomiska och miljömässiga konsekvenser. Skadehändelser hämtas från en annan analys som också hanterar konsekvensberäkningar och bara en skadehändelse från ett delsystem behandlas i denna rapport för att få en rimlig omfattning på uppgiften. Delsystemet som studeras tar ingen hänsyn till eventuella två-fas utsläpp, där både gas och vätska utströmmar. Endast gasutsläpp antas gälla. I analysen studeras inte riskreducerande åtgärder och sträcker sig endast till att analysera de samlade riskerna för att besvara frågeställningarna. En primär avgränsning för rapporten är att inte studera hur olika antaganden och modeller påverkar resultaten. Dessutom kommer individrisk inte användas i riskanalysen.

## 1.6 Begränsningar

Det som begränsar undersökningen är tillgänglig statistisk data avseende väderparametrar historiskt sett. Då endast data samlas in för särskilda klockslag påverkar det noggrannheten i fördelningarna. Ytterligare en begränsning är väntetiden för datorn att simulera ett stort antal scenarier. Även lagring av data för att skapa diagram är begränsande i Excel. Därför kommer ett tak på maximalt simulerade scenarier att sättas i studien.

## 2 Metod

Analysmodellen som skapas i arbetet tillämpar huvudsakligen ett arbetssätt av kartläggande karaktär, eftersom arbetet grundas i att "beskriva en företeelse" i linje med Höst, Regnell och Runeson (2006). Det är förenligt med syftet att beskriva noggrannhetens påverkan i kvantitativa riskanalyser. I arbetet formulerades först syfte och frågeställningar som är utgångspunkterna för rapporten. Därefter gjordes en litteraturstudie där det försöktes hämta information från tidigare forskning och undersökningar angående kvantitativ riskhantering och noggrannheter. Parallellt med litteraturstudien utformades rapportens analysmodell för att besvara syftet. Analysmodellen består av två delar, en del där antalet scenarier ökas successivt och en annan del där parametrarnas känslighet studeras. Slutligen analyserades resultatet och slutsatser drogs. Den övergripande metodiken redovisas i Figur 1 nedan. Rapportens litteraturstudier och analysmodellens uppbyggnad beskrivs mer ingående i fortsättningen av kapitlet.



Figur 1 Övergripande metodik för rapporten.

## 2.1 Litteraturstudier

Inledningsvis gjordes litteraturstudier där det hämtades information från forskning och undersökningar angående kvantitativ riskhantering och noggrannheter. Poängen är att inventera vad som finns skrivet inom området för att dra nytta av det i rapporten. Det försöktes hitta lämpliga databaser och sökord formulerades för att erhålla lämpligt material. Sökningar gjordes företrädesvis på engelska, men även på svenska. Av handledaren till rapporten mottogs tips på matnyttiga databaser och sökordmetodiker. I databaserna användes sökord för att finna litteratur och därefter lästes titlar, abstrakt, innehållsförteckningar och dokument för att sälla lämpligt innehåll från sökmängden. Relevanta resurser dokumenterades ner för att hålla ordning på alla inhämtningar samt djuplästes delar för att bli införstådd i publikationernas innehåll. Efter sökningar på en rad olika databaser landades det i att inhämta litteratur från Wiley, ScienceDirect och LUBsearch. Wiley tillhandahåller bland annat en onlinetjänst med tillgång till böcker, tidskrifter och andra databaser för olika ämnen (Wiley, 2022). ScienceDirect ger tillgång till granskad litteratur, bland annat böcker och tidskrifter (Elsevier, 2022). LUBsearch är en elektronisk plattform tillhandahållen av Lunds universitet som tillåter en att söka efter material, exempelvis tidskrifter, böcker och artiklar (Lunds Universitet, 2022).

## 2.2 Analysmodellen

Analysmodellen består av två delar där riskmått sedan användes till jämförelse för att besvara frågeställningarna. Riskmått som tillämpas är genomsnittlig dödlighet, maximal dödlighet kopplat till scenario och medeldifferens av frekvens relativt en referenslinje. I den första delen utökades antalet scenarier successivt från en låg noggrannhetsnivå till en hög för att avgöra om fler scenarier med utökade noggrannheter leder till ett träffsäkrare resultat. Ett träffsäkert resultat betyder i rapporten att ett riskmått tenderar att konvergera mot ett visst värde. Det är svårt att på förhand veta hur värdena beter sig vid fler scenarier och därför sätts inget förutbestämt konvergenskriterium. I den andra undersökningen hålls alla parametrars noggrannheter på den högsta nivån förutom en vars noggrannhet trappades upp gradvis. Detta gjordes för samtliga utvalda parametrar för att undersöka om det finns extra känsliga parametrar vars noggrannheter påverkar resultatet mest. Parametrar som undersöktes var tidsperiod, temperatur, vindriktning och vindstyrka. Båda undersökningarna används sedan till att försöka avgöra vid vilket skede resultatet inte påverkas nämnvärt i takt med utökad noggrannhet.

### 3 Litteraturstudier

Följande kapitel redovisar först hur litteraturstudien utfördes och därefter vad som hittades. Målet var här att försöka finna information angående kvantitativ riskanalys och även hur noggrannheterna samt antalet scenarier påverkar efterkommande resultat.

#### 3.1 Sökmetodik

Söktjänster valdes utifrån tidigare kännedom och tips från handledaren. De söktjänster som användes skrivs ut i Tabell 1. Efter i Tabell 2 redovisas vilka sökord som användes.

Tabell 1 Söktjänster som tillämpades i litteratursökningarna.

Söktjänster
LUBsearch ScienceDirect Wiley

Tabell 2 Sökord som skrevs in i söktjänsterna.

Engelska	Svenska
quantitative risk analysis ”quantitative risk analysis” QRA QRA AND reliability QRA AND validity QRA AND accuracy QRA AND (many scenarios)	kvantitativ riskanalys ”kvantitativ riskanalys” ”kvantitativ riskanalys” AND tillförlitlighet ”kvantitativ riskanalys” AND giltighet ”kvantitativ riskanalys” AND noggrannhet ”kvantitativ riskanalys” AND (många scenarier)

Sökstrategin var att först söka brett för att få en översiktlig bild av vad man kan hitta inom området genom att söka efter ämnesord. Sedan kombinerades flera ord i försök att bli mer precis i sökningen. Därefter användes funktion AND för att smala av sökningen ytterligare genom att det i träffarna behövdes innehålla flera sökord. Det användes även fraser för att begränsa sökningen i riktningen att ordföljder behandlades i en särskild ordning.

Genom att söka på quantitative risk analysis erhöles sökträffar i storleksordningen hundratusen för samtliga databaser som användes. Genom att frasera termen, det vill säga ”quantitative risk analysis”, reducerades antalet träffar till storleksordningen tusen. I de båda fallen hittades ungefär lika många relevanta träffar. Med intentionen att finna mer specifika artiklar användes AND-funktionen kopplat till QRA och risktermer. Samma sökord matades in i söktjänsterna och det resulterade i att antalet relevanta träffar varierade. I databaserna var det förekommande att flera relevanta artiklar dök upp på nytt fastän nya sökord matades in. Det konstaterades att sökningar på svenska i sammanhanget inte gav några relevanta träffar överhuvudtaget.

Oavsett hur många träffar som returnerades studerades upp till de femtio första om det fanns några relevanta sökträffar bland dem. I sådant fall studerades de närmare genom att bland annat läsa sammanfattning och slutsats. Det söktes även en del i artiklarnas referenser om där fanns något vettigt utöver det som redan fanns i den aktuella artikeln.

Databaserna bedöms vara trovärdiga då de har använts i andra examensarbeten, är tipsade från sakkunnigt folk och att de har tillämpats i tidigare sammanhang. Artiklarna som används från databaserna verkar också vara trovärdiga eftersom innehållande information går hand i hand med egen erfarenhet och lärdom inom riskhantering.

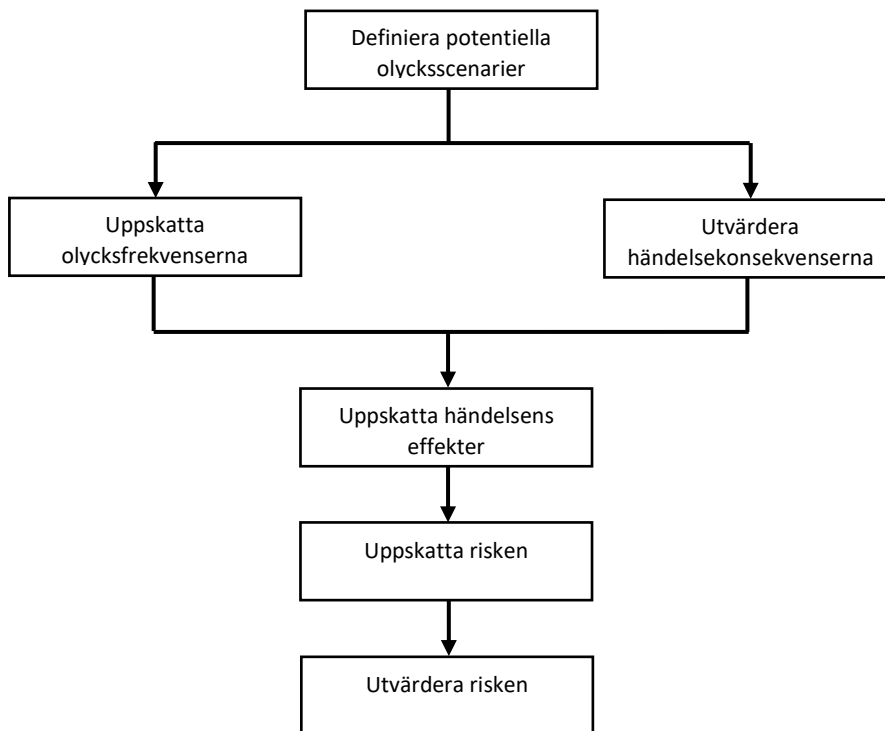
### 3.2 Kvantitativ riskanalys

Som tidigare konstaterades skriver Pasma et al. (2009) att det kan finnas fördelar med att placera processindustrier i tätbebyggda områden med nära tillgång till resurser. Författarna förklarar att farliga aktiviteter från verksamheter kan utgöra en risk för omgivningen. Pasma et al. (2009) påstår att etableringen av farliga verksamheter har ökat genom historien, där både invånare och arbetare kan vara utsatta för risk. Författarna konstaterar att åtgärder framtagits i form av riskanalysmetoder för att försöka kontrollera riskerna. Pasma et al. (2009) förklarar att riskanalyser både kan vara kvalitativa och kvantitativa. Författarna förklarar vidare att kvalitativa riskanalyser inriktas mer på att på rangordna risker medan kvantitativa riskanalyser är mer ingående med probabilistiska variabler för att beräkna komplexare samhällsrisker i anslutning till verksamheten. Arendt och Lorenzo (2000) hävdar att det förr i den kemiska processindustrin tillämpades mestadels erfarenhet för hantering av risker. Numera poängterar författarna att tekniken är mer utbredd och att andra sätt behövs för att kontrollera riskerna. Därför hävdar författarna att nya riskmetoder tagits fram, till exempel QRA (quantitative risk analysis). Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att metodiken exempelvis används inom kärnkraftverk, flygplansbranschen, militären och kemisk processindustri.

Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att en kvantitativ riskanalys (QRA) är ett analytiskt tillvägagångssätt för att hantera risker och därmed förbättra säkerheten för exempelvis industrier. Författarna redogör att det i en QRA används information med olika sannolikheter och probabilistiska data. De anser vidare att riskanalys som helhet handlar om att samla data och behandla den informationen för att förstå potentiella risker. Arendt och Lorenzo (2000) beskriver att förståelsen av en risk bottnar i hur sannolik den är, vad som kan gå fel och vilka konsekvenser som kan uppstå. Fortsättningsvis förklarar författarna att QRA syftar till att förstå numeriska uppskattningar av risker kopplat till anläggningen. De konstaterar ytterligare att en kvantitativ riskanalys kan användas i en rad olika processer, inte minst i kemiska processer. Författarna konkretiserar att en kvantitativ riskanalys kan appliceras på specificerade system såsom rör, utrustning, kemiska reaktioner etcetera. Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att analysen kan välja på att studera risker rörande ekonomisk förlust, miljöskadlighet och för hälsa samt säkerhet. De två sistnämnda kan enligt författarna handla om att uppskatta risken för allmänheten och arbetare att skadas av ämnen eller farliga aktiviteter. En viktig del i analysen är att uppskatta både sannolikheter och konsekvenser för att i slutändan bedöma risken, vilket skiljer sig från den kvalitativa delen (Arendt & Lorenzo, 2000). Arendt och Lorenzo (2000) skriver att resultatet kan presenteras på olika sätt och brukar därefter ställas mot acceptanskriterier för att avgöra om den totala riskbilden är tolerabel. Författarna påstår vidare att man kan sedan presentera risken på olika sätt, till exempel individ- och samhällsrisk. En QRA består huvudsakligen av fyra delar: riskidentifiering, konsekvensanalys, frekvensanalys och riskbedömning samt presentation (Arendt & Lorenzo, 2000). Fortsättningsvis förklarar Arendt och Lorenzo (2000) att den första delen av den kvantitativa riskanalysen utgörs av att identifiera olika typer av olyckor som tas hänsyn till. Författarna nämner sedan att parametrar som ska inkluderas inom analysens ramar bestäms. För konsekvensberäkningar i en QRA kan det behövas data för: vindriktning, vindhastighet, ytans grovhet och dos-responskurvor, med mera (Arendt & Lorenzo, 2000). Arendt och Lorenzo (2000) förklarar vidare att konsekvensanalysen uppskattar den statistiskt förväntade exponeringen för en population. Parallellt sker frekvensanalys innan risken ska utvärderas och presenteras (Arendt & Lorenzo, 2000).



I boken från CCPS (2000) skrivs det också om utförande av QRA, närmare bestämt CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis). Det beskrivs som en probabilistisk metodik som används inom den kemiska processindustrin (CCPS, 2000). Metodiken presenteras som ett flödesschema (CCPS, 2000), och återskapas i reducerad samt modifierad form nedan i Figur 2.



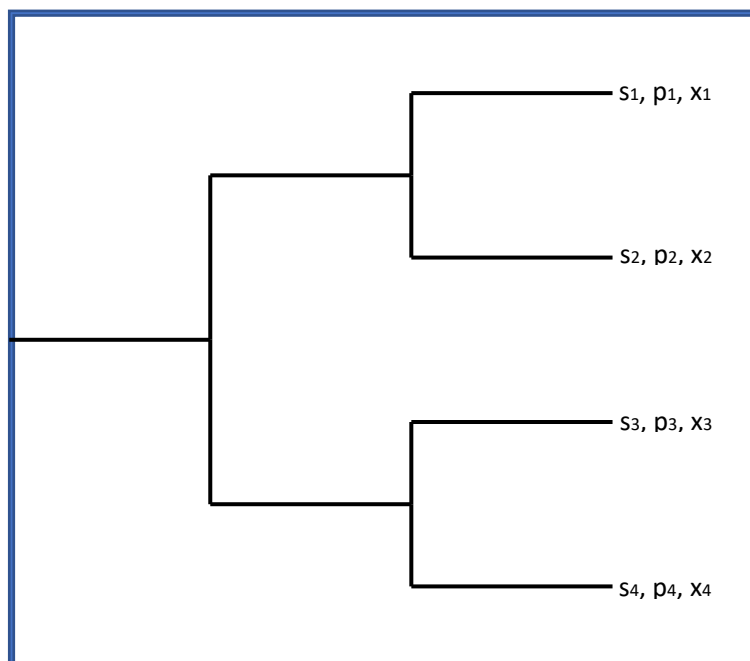
Figur 2 Flödesschema för en CPQRA.

Det grundläggande i en CPQRA är att olycksscenarier definieras och i det sammanhanget uppskattas riskerna (Arendt & Lorenzo, 2000). Kaplan & Garrick (1981) redogör för att risk handlar om tre saker: vad som kan hända, hur troligt att det händer och vad konsekvenserna är. Författarna förklarar att en riskriplett således kan bestå av: scenario, sannolikhet och konsekvens. De hävdar vidare att risken som innehåller alla scenarier kan uttryckas i formen  $R = \{ \langle s_i, p_i, x_i \rangle \}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), där  $s_i$  är ett identifierat scenario,  $p_i$  är sannolikheten för ett scenario och  $x_i$  är konsekvensen för ett scenario (Kaplan & Garrick, 1981). Kaplan & Garrick (1981) beskriver att kumulativ sannolikhet kan beräknas genom att sortera scenarierna i allvarlighetsgrad, från lägst till störst konsekvens ( $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N$ ). Den kvantitativa risken i form av scenarier visas även i Tabell 3 nedan (Kaplan & Garrick, 1981).

Tabell 3 En lista med scenarier och kumulativa sannolikheter.

Scenario	Sannolikhet	Konsekvens	Kumulativ sannolikhet
$S_1$	$p_1$	$X_1$	$P_1=P_2+p_1$
$S_2$	$p_2$	$X_2$	$P_2=P_3+p_2$
...	...	...	...
$S_i$	$p_i$	$X_i$	$P_i=P_{i+1}+p_i$
...	...	...	...
$S_{N-1}$	$p_{N-1}$	$X_{N-1}$	$P_{N-1}=P_N+p_{N-1}$
$S_N$	$p_N$	$X_N$	$P_N=p_N$

Arendt och Lorenzo (2000) skriver att ett händelseträd illustrerar möjliga utfall som kan uppstå efter en inledande händelse och att detta kan användas i en CPQRA. Fortsättningsvis redogör författarna att den inledande händelsen exempelvis kan utgöras av en olycka där gasutsläpp sker av farligt ämne på grund av rörläckage. I händelseträdet kan detta förgrena sig och leda olika utfall beroende på vilka förutsättningar som råder, exempelvis: vindstyrka, atmosfärisk stabilitet och vindriktning (Arendt & Lorenzo, 2000). Arendt och Lorenzo (2000) förklarar vidare att förgreningarna består av sannolikheter och genom att multiplicera dessa genom händelseträdet kan man beräkna sannolikheterna för utfallen. De kvantitativa utfallen kan även uttryckas i form av frekvens enligt författarna. Varje utfall kan sedan specificeras med en viss konsekvens (Arendt & Lorenzo, 2000). Nedan i Figur 3 visas hur ett händelseträd kan utformas utifrån beskrivningen ovan där utfallen längst till höger motsvarar scenarierna.

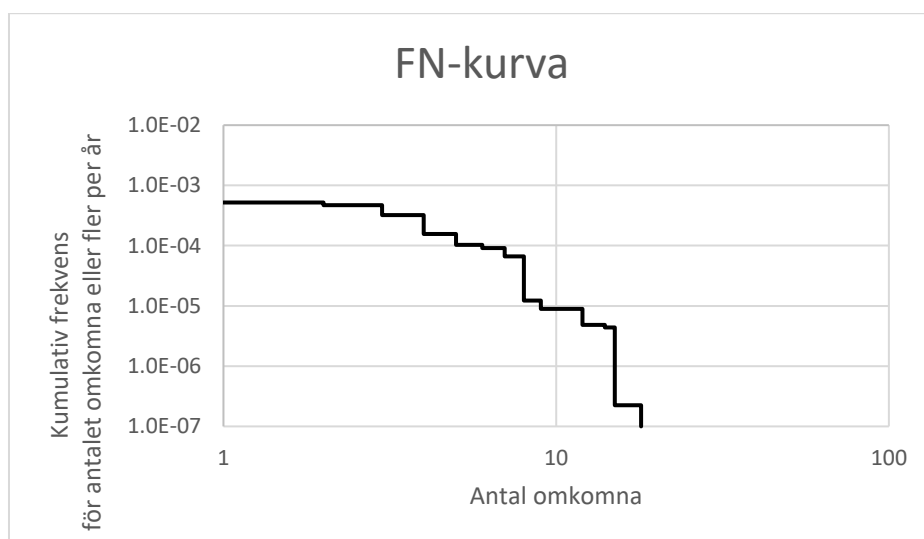


Figur 3 Principiellt utseende för ett händelseträd.

### 3.3 Presentation av risk

#### 3.3.1 Samhällsrisk

Man kan presentera risker på olika sätt. CCPS (2000) förklarar att termen samhällsrisk är ett riskmått som uppskattar risken beträffande en grupp av människor som befinner sig i en effektzon som kan bli utsatt för en typ av incident eller olycka. Det beskrivs att det kan handla om hur många människor som drabbas av någon form av incident i sammanhanget. Samhällsrisk brukar ofta illustreras med en FN-kurva, som är ett samband mellan frekvens och dödliga händelser (CCPS, 2000). Det innebär att upprättandet av diagrammet fodrar både frekvens och konsekvens där frekvensen adderas kumulativt (CCPS, 2000). Det görs i samma princip som i Tabell 3 med undantaget att det gäller för frekvens i stället för sannolikhet. CCPS (2000) beskriver vidare att FN-diagrammets omfång kan sträcka sig över flera storleksordningar och därför är det vanligt förekommande att dimensionerna utformas logaritmiskt. Ju fler personer som vistas i ett område desto större blir samhällsrisk för det fallet (CCPS, 2000). I Figur 4 återskapas en typisk FN-kurva med godtyckliga data med format enligt tidigare beskrivning där ekvation 1-2 längre ner ligger till grund för skapandet.



Figur 4 Ett exempel på hur en FN-kurva kan se ut.

För att erhålla data till FN-kurvan används bland annat ekvation 1 för att bestämma antalet människor som påverkas av en incident.

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} p_{f,i} \quad (\text{Ekvation 1})$$

Där  $N_i$  är antalet dödsfall som förorsakas från en incidens,  $P_{x,y}$  motsvarar människoantalet vid en lokalisering och  $p_{f,i}$  som är sannolikheten för att ett incidensfall vid en viss lokalisering leder till dödlighet.

Enligt tidigare finns det behov av att fastställa den kumulativa frekvensen, vilket kan göras med ekvation 2 härnäst.

$$F_N = \sum_i F_i \quad (\text{Ekvation 2})$$

Där  $F_N$  är den kumulativa frekvensen av samtliga incidenter och  $F_i$  är frekvensen för en viss incidens med förbehållet  $N_i \geq N$ . Det vill säga frekvenserna summeras i samma princip som i Tabell 3.

### 3.3.2 Genomsnittlig dödlighet

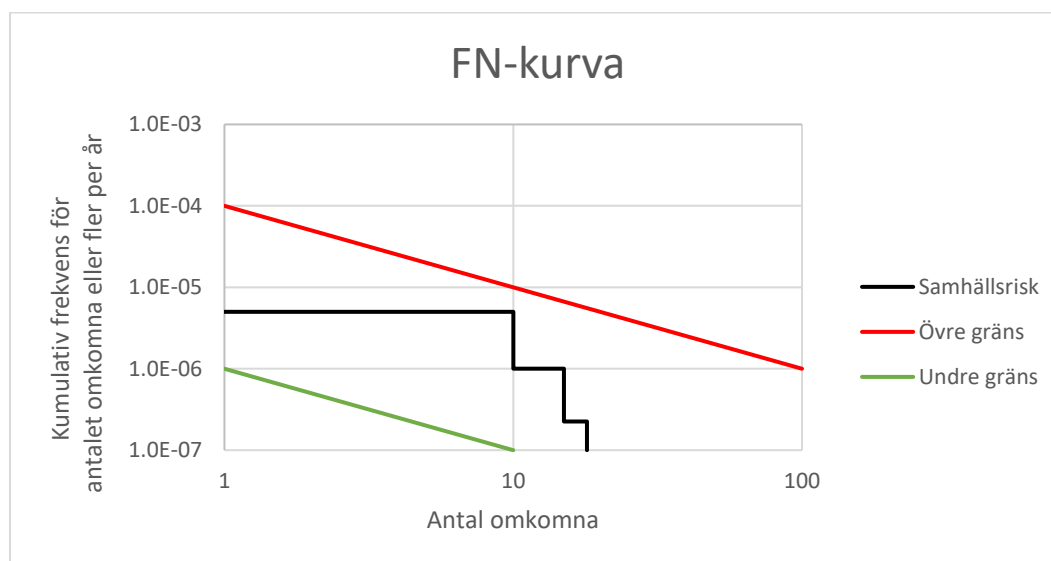
Enligt CCPS (2000) är medelvärdet av antalet omkomna, eller motsvarande genomsnittlig dödlighet, ett riskindex som presenteras som enskilda siffror. Beräkningen kan ske med hjälp av ekvation 3.

$$\text{Genomsnittlig dödlighet} = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad (\text{Ekvation 3})$$

Varav  $f_i$  är frekvensen för ett utfall [ $\text{år}^{-1}$ ],  $N_i$  är antalet omkomna från utfallet,  $i$  är ett specifikt utfall och  $n$  är det totala antalet utfall.

### 3.3.3 Riskvärdering

I en rapport skriven av Davidsson, Lindgren & Liane (1997) skrivs det om olika kriterier för att värdera samhällsrisk. Författarna ger exempel på en övre gräns som specificeras med en frekvens på  $10^{-4}$  per år med ett dödsfall och en undre gräns med en frekvens på  $10^{-6}$  per år med ett dödsfall. Både den övre och undre gränsen kan illustreras i en FN-kurva med lutningen -1 (Davidsson, Lindgren, & Liane, 1997). Davidsson, Lindgren & Liane (1997) förklarar att under den undre gränsen betraktas riskerna som små och under den övre gränsen kan riskerna godtas under vissa omständigheter. Vidare belyser författarna ALARP (As Low As Reasonably Practicable) som ett område mellan den övre och undre gränsen där risker i vissa fall kan godtas under förutsättningen att alla rimliga säkerhetshöjande åtgärder redan är införda. Rimliga åtgärder kan handla om riskreducerande lösningar där kostnaden är godtagbar i sammanhanget (Davidsson, Lindgren, & Liane, 1997). Figur 5 nedan visar en FN-kurva med kriterierna för värdering av risk.



Figur 5 FN-kurva med övre och undre acceptanskriterium.

### 3.3.4 Individrisk

CCPS (2000) förklarar att individrisk är risken som en människa är utsatt för i närheten av en fara. Det beskrivs vidare att det handlar om sannolikheten för att en skada ska inträffa över en viss tidsperiod. Det kan beräknas fram olika typer av individrisker: individriskkonturer, maximal individrisk, medelvärdet av individrisk för den utsatta befolkningen och medelvärdet av individrisk för hela befolkningen med mera (CCPS, 2000).

## 3.4 Utmaningar i QRA

### 3.4.1 Antaganden och begränsningar

Arendt och Lorenzo (2000) förklarar hur olika antaganden och begränsningar påverkar en QRA. Författarna skriver att det finns begränsningar i hur komplett det går att utföra analysen då det inte går att identifiera och modellera alla risker varav frekvenser och konsekvenser. Arendt och Lorenzo (2000) hävdar vidare att QRAs brukar i slutändan få utesluta de allra minsta riskerna med kvalitativa omdömen, och skifta fokus till att inriktas på uppenbara och överhängande risker. Det betyder att en central begränsning är att det inte är möjligt att studera alla potentiella scenarier utan en avgränsning är nödvändig i sammanhanget (Arendt & Lorenzo, 2000).

### 3.4.2 Modeller

Arendt och Lorenzo (2000) poängterar att giltigheten för vald modell också kan ha påverkan på resultatet. Dessutom påstår författarna att modeller är ett försök till att uppskatta verkligheten, men att modellerna inte kan beskriva de exakta utfallen då de inte behandlar alla faktorer som påverkar en olycka. De betonar också att en modell kan gälla för vissa fall, men inte nödvändigtvis i det aktuella avseendet. Fortsättningsvis beskriver Arendt och Lorenzo (2000) ytterligare allmänt hur begränsningar och osäkerheter påverkar resultat i kvantitativ riskanalys. Författarna påstår att mer fullständiga modeller för QRA skulle kunna generera mer noggranna resultat. De anser även att den bästa modellen kan ge felaktiga resultat om indata är felaktig och därför kan bristfälligt dataunderlag vara ett problem.

### 3.4.3 Osäkerheter

Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att osäkerheter och träffsäkerhet hör samman och är relevanta för utfallet. Därtill anser de att träffsäkerheten för en absolut risk beror bland annat på: antalet väsentliga faktorer som analyseras kopplat till risken, om de matematiska modellerna är realistiska för att uppskatta olycksfenomenet och på indatas statistiska osäkerheter. Dessutom är träffsäkerheten beroende av resurserna (Arendt & Lorenzo, 2000). Arendt och Lorenzo (2000) beskriver att både frekvens- och konsekvensuppskattningar kan innehålla stora osäkerheter. Vidare understryker författarna att osäkerheterna också kan komma ifrån kemiska eller fysiska egenskaper som kan ge upphov till osäkerheter i utsläpps- och spridningsmodeller. Pisman et al. (2009) förklarar att det finns faktorer som oundvikligen leder till varians i utfallen, däribland: antaganden, datorberäkningstid, komplexitet och typ av erfarenhet. Författarna skriver vidare att egenskaper kan uttryckas i form av sannolikhetsfördelningar och genom att använda dessa kan man få träffsäkrare resultat jämfört med att bara tillämpa enstaka medelvärden. Arendt och Lorenzo (2000) förklarar att det finns åtskilliga databaser att inhämta data ifrån och det kan vara väsentligt att välja samt anpassa data till aktuellt fall. Författarna beskriver att osäkerheter kan komma från avsaknad av data, men den betydande osäkerheten brukar utgöras av antaganden eller modeller. De förklarar att det kan vara värdefullt att utföra känslighetsanalyser på antaganden och modeller för att spegla osäkerheter.

Pisman et al. (2009) nämner olika åtgärder som kan vidtas för att om möjligt reducera variabilitet och osäkerheter i riskanalyser. Först gör författarna distanseringar mellan olika typer av osäkerheter. De beskriver att osäkerheter skulle kunna härröras från avsaknad av tillräckliga data. Dessutom beskriver Pisman et al. (2009) om en annan form av osäkerhet som handlar om den inneboende slumpmässiga osäkerheten i storheter. De förklarar att regelverk är ett förslag för att styra upp analyserna även om åtgärden kan ha negativa aspekter när det kommer till innovativa och utvecklande lösningar. Författarna skriver även om andra förslag att utveckla dataunderlag med bättre fördelningar, till exempel är det förekommande med felfrekvenser som punktvärden som i stället till fördel kan tilldelas fördelningar. De påstår vidare att riskidentifiering och definitioner av scenarier är två moment där de störta osäkerheterna uppstår. Författarna belyser också att människors respons till giftiga ämnen påverkas väsentligt av osäkerheter.

#### 3.4.4 Robusthet

En svaghet för QRAs är problematiken i att återskapa resultatet av andra oberoende experter (Arendt & Lorenzo, 2000). Arendt och Lorenzo (2000) påstår att antaganden som olika upphovspersoner gör kan styra resultatet genomgripande i olika riktningar. Detta går i linje med Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) som också beskriver att riskanalytiker som gör riskanalyser på samma fall kan få skilda resultat i storleksordningar. Pisman et al. (2009) skriver om att robustheten avser att resultatet inte ska vara beroende av vem som genomför analysen, det vill säga reproducerbarheten bör vara likvärdig. Författarna betonar i samma riktning att det i flertalet experiment visas att experters resultat kan fluktuera mycket trots stor erfarenhet. Det finns även en tendens att riskanalytiker är konservativa i antaganden vilket kan mynna ut i att riskerna överskattas och även detta är ett skäl till att känslighetsanalyser kan vara vettiga att genomföra (Arendt & Lorenzo, 2000).

#### 3.4.5 Riskvalidering

Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) hävdar att det finns en viss avsaknad av riskvalidering i QRAs. De beskriver att validering är en konceptterm som kortfattat handlar om att man mäter det som man avser att mäta. Fortsättningsvis förklarar Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) att kriterier för konceptuell validering skulle kunna vara att man omvandlar befintliga osäkerheter till sannolikhetsmått, att samtliga okända kvantiteter beaktas i modellen och att man hanterar rätt kvantiteter och storheter. Vidare poängterar författarna att validering kan handla om olika saker beroende på hur riskanalytikern är inställd i frågan. De nämner att riskrealister försöker bekräfta att uppskattningarna konvergerar mot rätt värden där man ifrågasätter med empirisk information resultatet av modellen. Däremot förklarar författarna att för riskkonstruktivister handlar validering inte om rätta värden utan snarare om att rättfärdiga val som görs ifrån påståenden angående risken. Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) nämner om ansvar där riskanalytikern har ansvaret att utveckla modellen och resultattolkningar utifrån begränsningar och antaganden berörande modellen. Författarna förklarar vidare att osäkerheterna kan även bli lidande av att felaktiga verktyg, metoder och data används. De beskriver även en annan typ av validering, pragmatisk validering, som bland annat kritiserar QRAs för att förlita sig för mycket till siffror som beräknas fram. Författarna förklarar att denna typ av validering ifrågasätter också hur väl risker och bidragande faktorer identifierats och hur exakt analysen har uppskattat systemriskerna. Tre krav beskrivs av Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) och förmodas kunna avgöra hur effektiv en QRA är: noggrannhet, kostnadseffektivitet och användbarhet. Författarna poängterar att pragmatisk validering kan vara ett tillvägagångssätt för att lyckas med detta. Man kan jämföra med en parallell analys av samma system eller en del av det, jämföra med operativ erfarenhet av liknande system och granska processen som ligger till grund för analysen (Goerlandt, Khakzad, & Reniers, 2017). Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) redovisar vidare vilka egenskaper som validerar en QRA. Författarna beskriver att den bör vara komplett och täcka alla betydande element. De anser också att en QRAs validering beror på dess grundlighet, grad av integration, systemhelhet och öppenhet. Författarna behandlar även problem gällande validering. Ett exempel de nämner är att det inte alltid är självklart vilka riskkriterier som ska användas. Dessutom betonar författarna att all bakgrundsdata inte alltid finns tillgänglig för fallet, vilket försvårar bedömningarna.

### 3.4.6 Datorisering

CCPS (2000) förklarar att manuella beräkningar för individ- och samhällsrisk kan bli tidskrävande redan efter ett antal utfall och att det kan uppstå aritmetiska fel på grund av misstag. Fördelaktigt kan kalkyleringarna datoriseras för att lättare hantera åtskilliga utfall och det hävdas att program med kalkylark kan vara behjälpligt (CCPS, 2000). Pisman et al. (2009) poängterar att det används mjukvaror för modellerandet och det finns här aspekter som är viktiga för tillförlitligheten. Till exempel nämner författarna att programmet bör vara transparent och verifierbart. Vidare anser författarna att det bör vara möjligt att få inblick i programmet genom att begränsningar, antaganden och värden blir åtkomligt för användaren.

## 3.5 Övrigt

### 3.5.1 Ammoniaks egenskaper

I en bok om toxicitet, med chefredaktör Wexler (2014), förklaras bland annat vad ammoniak har för effekter. Ammoniak har ett lukthetsområde som befinner sig mellan 1–5 ppm. Det förklaras att människor börjar få hälsobesvär och obehag redan när koncentrationer uppstår över 20 ppm. Under naturliga omständigheter förekommer ammoniak som gas och således exponeras människor mestadels av gasen genom inandning (Wexler, 2014). Det beskrivs även av Wexler (2014) att exponeringen kan ske genom hudkontakt. Vidare nämns att under normala förhållanden uppmäts koncentrationer av ammoniak i luften till 1 ppb. Ammoniak ackumuleras inte inne i kroppen eller i utomstående miljö (Wexler, 2014). Wexler (2014) förklarar att omedelbara effekter av ammoniaks närvaro i förhöjda koncentrationer är brännande känsla i hud, ögon och i luftvägarna. Dessutom hävdas att ammoniak löses upp i vävnadernas vatten och kan därmed bryta ner cellprotein som i nästa steg kan döda celler. Det fastställs också att en koncentration över 100 ppm irriterar luftvägar och ögon. En allvarlig irritation kan uppträda mellan 400–700 ppm (Wexler, 2014). Fortsättningsvis påstår Wexler (2014) att exponeringar mellan 2500–4500 ppm kan leda till dödlig utgång inom loppet av 30 minuter. Därtill nämns att dödligheten orsakas i första hand på grund av att luftvägarna skadas avsevärt. För personer som omkommer dagar efter kontakt med ammoniak brukar anledningen vara infektioner och andra komplikationer (Wexler, 2014).

### 3.5.2 Visual Basic for Applications

På Microsofts hemsida (2021) förklaras det att Visual Basic for Applications (VBA) är ett programmeringsspråk som är tillämpligt på Office-tjänsterna. Allt som utförs förhand kan man också åstadkomma genom programmet och det är vanligt att programmet används för att automatisera uppgifter som är repeterbara (Microsoft, 2021).

## 4 Analysmodellen

Analysmodellen utgörs av två undersökningsmetodiker som beskrivs inledningsvis i kapitlet. Modellen kopplas sedan till metodiken för kvantitativ riskanalys vars steg och värden också redogörs för i detta kapitel. Detta för att besvara frågeställningarna genom att tillämpa analysmodellen på en ammoniakanläggning i Skärhamn. Tillhörande beräkningarna till QRA kodas in ett egenskrivet program i VBA kopplat till Excel.

### 4.1 Undersökningsmetodiker

I följande avsnitt kommer först analysmodellen att skapas genom två undersökningsmetodiker och sedan tre riskmått som används till jämförelse av resultat för att kunna besvara frågeställningarna. Undersökningsmetodikerna benämns som ”successivt utökad antal scenarier” och ”parameterkänslighet” och beskrivs ingående nedan.

#### 4.1.1 Successivt utökad antal scenarier

En av frågeställningarna handlar om utökade noggrannheter med fler scenarier i en QRA leder till ett träffsäkrare resultat. I rapportens kontext innebär träffsäkerhet att ett riskmått tenderar att konvergera mot ett visst värde. Inget förutbestämt konvergensvillkor kommer att sättas då det inledningsvis inte finns vetenskap om hur värdena kommer att påverkas i takt med fler scenarier. För undersökandet ökas parameternoggrannheter och scenarier successivt. Parametrar som används i rapporten är tidsperiod, temperatur, vindriktning och vindstyrka då de förväntas påverka analysen mest utifrån kommande konsekvensberäkningar. Parametrarna kommer dessutom att tilldelas sannolikhetsfördelningar. Det går att ändra parametrarnas fördelningar och testkombinationerna sinsemellan på ett oändligt antal sätt. Följaktligen avgränsas undersökningen till 6 olika analysnivåer av noggrannheter. I varje analysnivå finns en viss grad av finfördelning för varje parameter, det vill säga uppdelning i parameternivå. I de högre analysnivåerna kommer noggrannheten successivt att utökas för samtliga parametrar. Det innebär att första analysnivån är den mest triviala medan den sjätte är mest raffinerad. Noterbart är att fördelningar i de sex olika analysnivåerna inte kombineras med varandra för beräkning av scenarier. Detta för att avgränsa antalet simuleringar som verkställs i samma analysnivå. I Tabell 4 nedan sammanställs antalet diskreta värden som plockas från respektive parameters sannolikhetsfördelning vid varje analysnivå. Dessutom visas totala antalet scenarier för samtliga simuleringar som är produkten av antalet uppdelningar för alla parametrar i en analysnivå. I senare avsnitt kommer parametrarnas sannolikhetsfördelningar att presenteras på parameternivå. Den redovisade undersökningsmetodiken kommer även att användas för att försöka analysera vid vilket skede utökad noggrannhet får mindre betydelse. Skedet kommer i denna kontext handla om antalet scenarier.

Tabell 4 Parametrars uppdelning för nivå 1-6.

Nivå	Tidsperiod	Temperatur	Vindriktning	Vindstyrka	Antal scenarier
1	1	1	2	1	2
2	1	2	4	2	16
3	2	3	8	3	144
4	2	4	16	4	512
5	4	5	32	5	3 200
6	4	6	64	6	9 216



#### 4.1.2 Parameterkänslighet

Den andre frågeställningen berör vilka parametrar vars noggrannhetgrad som påverkar resultatet mest. Detta skulle kunna ses som en känslighetsanalys då känsligheten i resultatet kommer att studeras. Analysen åstadkoms genom att initialt sätta alla parametrars uppdelningar på den finaste nivån (nivå 6) där sedan varje enskild parameter trappas upp från lägsta till högsta nivån. Följaktligen sker upptrappningar för 4 parametrar och totalt 22 upptrappningar (4 + 6 + 6 + 6). Antalet värden som tas från parametrarnas sannolikhetsfördelningar ökas med ett för varje upptrappning. Undantaget är vindriktningen som trappas upp enligt: 2, 4, 8, 16, 32, 64. Upptrappningen för respektive parameter visas i Tabell 5. Ett exempel på en upptrappning av vindstyrkeparametern visas i Tabell 6. Anledningen till att resterande parametrar modelleras med rapportens högsta upplösning är att resultatet minimalt ska påverkas av dem i förmån till upptrappningsparameterns studerande. Även denna undersökningsmetodik kommer att användas för att försöka analysera vid vilket skede utökad noggrannhet får mindre betydelse. Det avgörs när antalet parameteruppdelningar inte längre påverkar resultatet markant.

Tabell 5 Upptrappning för respektive parameter.

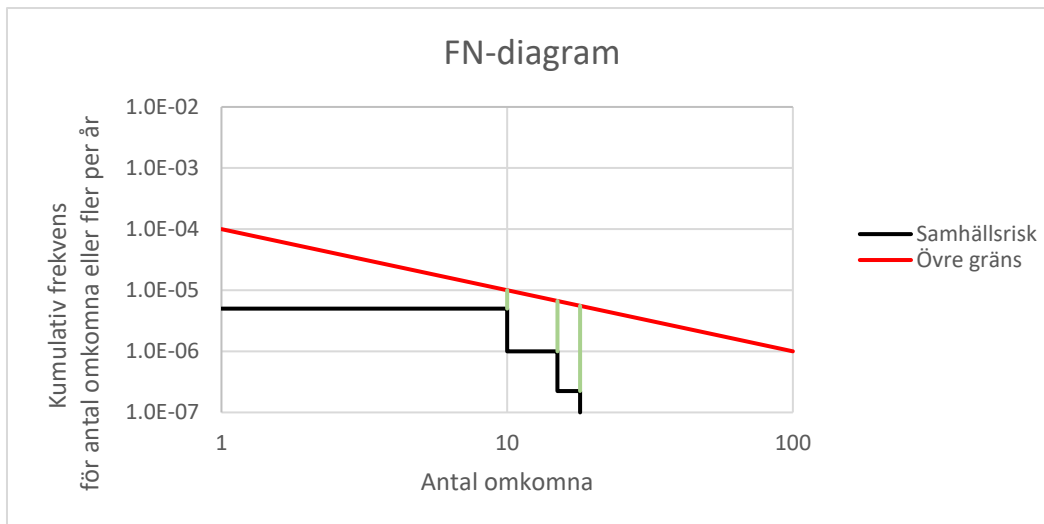
Tidsperiod	Temperatur	Vindriktning	Vindstyrka
1 → 4	1 → 6	2 → 64	1 → 6

Tabell 6 Ett exempel på en upptrappning av antalet värden hos vindstyrkeparametern (i fetformatering).

Nivå	Tidsperioder	Temperatur	Vindriktning	Vindstyrka	Antal scenarier
*	4	6	64	<b>1</b>	1536
*	4	6	64	<b>2</b>	3072
*	4	6	64	<b>3</b>	4608
*	4	6	64	<b>4</b>	6144
*	4	6	64	<b>5</b>	7680
6	4	6	64	<b>6</b>	9216

#### 4.1.3 Riskmått för jämförelse av noggrannhet

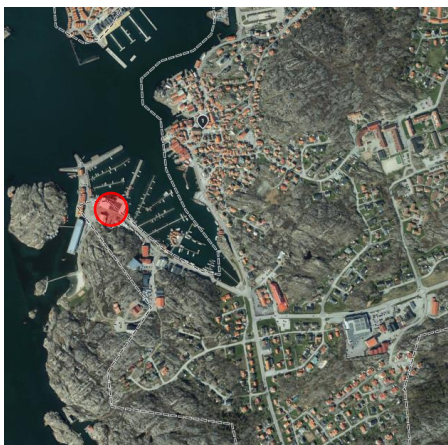
Riskmåttan används till jämförelse i analysmodellen för att kunna besvara frågeställningarna. Det första nämnda riskmättet som används är genomsnittlig dödlighet som är en summerad multiplikation av frekvens och antalet drabbade, se tidigare ekvation 3. Det betyder att det kommer utföras en multiplikation av samtliga olycksfrekvenser och händelsekonsekvenser som i nästa steg adderas ihop. Då kommer resultatet få enheten drabbade per år. Andra riskmättet är maximal dödlighet kopplat till scenario. Det erhålls genom att välja den produkt av olycksfrekvens och händelsekonsekvens som leder till det högsta värdet, vars enhet också är drabbade per år. Tredje riskmättet, som egentligen borde betraktas som ett jämförelsemått, är medeldifferens av frekvens. Det åstadkoms genom att för varje scenario på FN-kurvan beräkna skillnaden i frekvens till en förutbestämd referenslinje och sedan ta medelvärdet. Förenklat uttryckt är det medelvärdet av längden för de tre gröna linjerna som illustreras i Figur 6 nedan. Riskmättet har som ändamål att avgöra hur mycket FN-kurvans utseende förändras från ett tillstånd till ett annat. Referenslinjen kommer att avbildas i enlighet med ett övre kriterium för värdering av samhällsrisk där frekvensen är  $10^{-4}$  per år med ett dödsfall som fortlöper med lutningen -1, enligt avsnitt 3.3.3 Riskvärdering. Riskmåttan kommer i viss mån att uttryckas med relativ förändring i diagram mellan analysnivåer och även mellan upptrappningar i undersökningsmetodikerna. Vidare observeras hur FN-kurvornas utformning förändras i enlighet med undersökningsmetodikerna. För att avgränsa arbetet kommer individrisk inte att användas som riskmått i rapporten.



Figur 6 FN-diagram med vertikala linjer upp till den övre gränsen för att markera skillnaden i frekvens.

## 4.2 Definition av olycksscenarier

Skadehändelser som används i rapporten hämtas från Skärhamnsanalysen och kommer att användas som fallstudie i undersökningen. I fallstudien finns Skärhamns Frys AB som är en kyl- och frysverksamhet innehållande det hälsoskadliga ämnet ammoniak (Haeffler, Hannah, Davidsson, & Akersten, 2000). Alla skadehändelser som kan inträffa i verksamheten behandlas inte och i stället väljs endast en på grund av att flera inte förväntas bidra till att besvara syftet mer, utan behövs snarare för exemplens skull. Därför tas bara en skadehändelse (UHG-19-FB) från ett delsystem som utgörs av gasläckage bestående av ammoniak från högtryckskärl utomhus. Utsläppet antas ha ett cirkulärt hål med en diameter på 100 millimeter och en frekvens på  $2.33 \cdot 10^{-5}$  per år (Haeffler et al., 2000). Med utgångspunkt från olyckshändelsen utmynnas olycksscenarier beroende på konsekvensberäkningar och parametervärden. För att avgränsa studien väljs det bara att beakta en typ av spridningsmodell, nämligen fri cirkulär jet i medvind, som förklaras mer senare. Koncentrationer som beräknas till följd av utsläppet gäller för marknivå. Vidare gäller att konsekvenserna endast avses för dödlighet på människor vid en specifik koncentration på 4500 ppm, se 3.5.1 Ammoniaks egenskaper. Ingen hänsyn tas till ekonomiska och miljömässiga konsekvenser. Endast gasutsläpp antas drabba omgivningen. Målet med olycksscenarierna är att beräkna resultat med successivt finare noggrannheter med hjälp av diverse riskmått efter konsekvensberäkningar, och kvantifiera skillnader i resultat mellan olika nivåer av noggrannheter. En bild över verksamheten i Skärhamn visas i Figur 7 undertill.



Figur 7 En karta som visar verksamheten i Skärhamn (Eniro, 2022). Verksamheten är markerad med röd färg.

## 4.3 Uppskattning av olycksfrekvenser

Följande avsnitt används som grund för att fastställa värdena på olycksfrekvenserna samt redogöra för hur diskreta värden på parametrarna väljs.

### 4.3.1 Tidsperiod

I analysen väljs det att tillämpa tre olika nivåer av tidsperioder där varje högre nivå upplöses mer exakt. Om en uppdelning sker bland årstiderna görs det genom antagande att sommar innefattas av juni, juli och augusti. Följaktligen anses resterande månader vara vinter. Väderdata som insamlats från Måseskärs väderleksstation redovisas för timmarna 03.00, 06.00, 09.00, 12.00, 15.00 och 18.00 (SMHI, 2022). För nivåer vars tid är indelad i dag och natt antas utifrån ovanstående timmar att en dag är mellan 06.00-18.00, vilket kommer täcka dataklockslagen 09.00,12.00 och 15.00. På motsvarande sätt antas att en natt är mellan klockslagen 18.00-06.00, som därutav kommer att innesluta dataklockslagen 18.00, 03.00 och 06.00. Det innebär att natt och dag blir lika långa, det vill säga tolv timmar vardera. Efter att en tidsperiod är specificerad för en nivå används aktuella uppdelningar för att sortera väderdata i varje tidskluster. I praktiken genomgås alla datapunkter för parametrarna temperatur, vindriktning och vindstyrka som finns lagrade i kalkylblad kopplat till Excel från SMHI. Värdena kommer att sorteras i linje med tidsperiodernas villkor. Till exempel skulle det innebära att en uppdelning i sommar och vinter leder till att sommar får en normalfördelning och vintern får en annan för en viss parameter, däribland temperatur, vindriktning och vindstyrka. Programmet behandlar data för perioden 01/01/1988 – 31/10/1995. Dock genomfördes Skärhamnsanalysen med intervallet 01/01/1988 – 31/12/1997 (Haeffler et al., 2000). Dessvärre finns inte mätdata för de två sista åren tillgängliga för närvarande. Tidsperioderna redovisas i Tabell 7, Tabell 8 och Tabell 9 undertill. För varje kluster skrivs dess sannolikhet ut inom parentes som beror både på andelen månader och timmar. Månaderna har spannet 1-12 och timmarna 1-24. Tiden avgör även i rapporten vilken populationstäthet som gäller i ett område vid en viss noggrannhet och därför integreras populationstätheten i tidsparametern, mer om det senare.

Tabell 7 Tidsperiod som sträcker sig över hela året.

Nivå 1		
Kluster	Månader	Timmar
Hela året (P=1)	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	3,6,9,12,15,18

Tabell 8 Tidsperioder uppdelade i sommar och vinter.

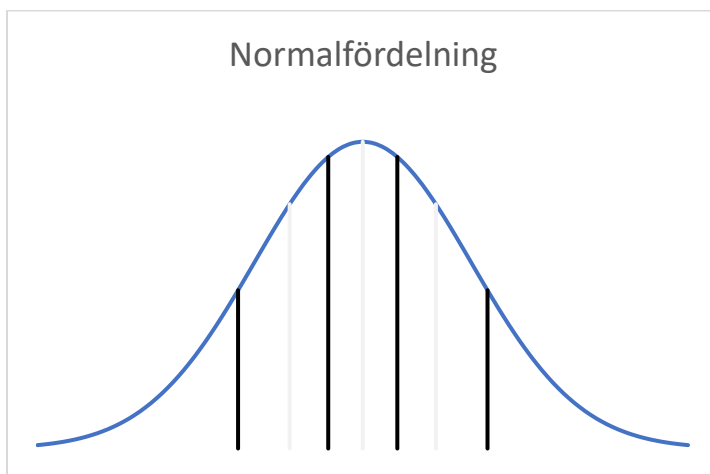
Nivå 2		
Kluster	Månader	Timmar
Sommar (P=0,25)	6,7,8	3,6,9,12,15,18
Vinter (P=0,75)	1,2,3,4,5,9,10,11,12	3,6,9,12,15,18

Tabell 9 Tidsperioder uppdelade i sommar och vinter med respektive dag och natt.

Nivå 3		
Kluster	Månader	Timmar
Sommar-Dag (P=0,125)	6,7,8	9,12,15
Sommar-Natt (P=0,125)	6,7,8	18,3,6
Vinter-Dag (P=0,375)	1,2,3,4,5,9,10,11,12	9,12,15
Vinter-Natt (P=0,375)	1,2,3,4,5,9,10,11,12	18,3,6

### 4.3.2 Temperatur

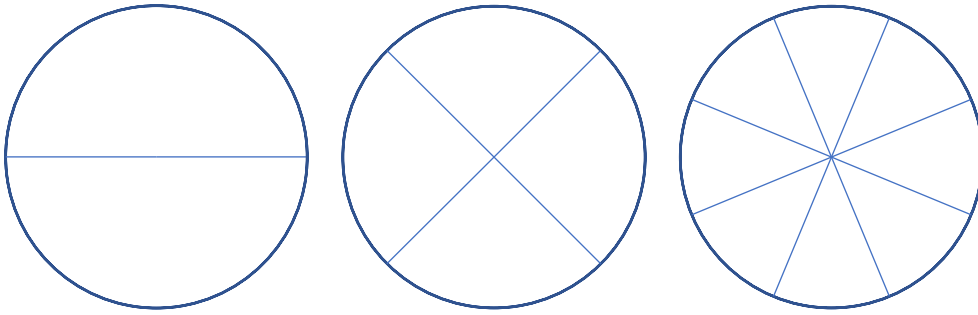
Temperaturen antas vara normalfördelad. Det verkar lämpa sig då det finns en stor mängd data till förfogande. Normalfördelningen kommer att delas i lika många delar som parameternivån anger i analysnivån. Det resulterar i att varje temperaturvärde får samma sannolikhet som alla andra temperaturvärden. Med andra ord blir uppdelningen lika i procentuella delar omkring de diskreta värdena. Det betonas att flera normalfördelningskurvor förekommer för temperaturen i simuleringarna beroende på vilken tidsperiod som gäller för ett särskilt scenario. Till exempel kommer temperaturen ha en viss normalfördelning på sommaren och en annan normalfördelning på vintern med intentionen att säsongerna får mer passande fördelningar. I Tabell 9 har exempelvis sommar-dag en normalfördelning medan sommar-natt har en annan. Temperaturen finns inte explicit i något av ekvationsuttrycken, men det antas däremot påverka luftdensiteten. Temperaturdata inhämtas också från Måseskärs väderstation. Normalfördelningskurvan visas som ett exempel i Figur 8 med fyra uppdelningar.



Figur 8 Normalfördelning för en parameter uppdelad i ett antal värden, i detta fall 4 procentuellt lika delar som exempel.

### 4.3.3 Vindriktning

Måseskärs väderstation har även historiska data på var vindriktningen kommer ifrån där  $0^\circ$  motsvarar norr,  $90^\circ$  öster,  $180^\circ$  söder och  $270^\circ$  väster (SMHI, 2022). Första nivån av noggrannhet har 2 vindriktningar, vilket blir norr och söder. De efterföljande parameternivåerna har antalen: 4,8,16,32,64 etcetera. Mönstret tyder på att antalet vindriktningar i parameternivå följer sambandet  $2^n$ , varav  $n$  i detta fall motsvarar analysnivån. Ju fler vindriktningar desto fler förgreningar och scenarier blir det i händelseträdet. Maximalt görs 6 olika analysnoggrannheter som resulterar i att 64 vindriktningar tillämpas i den mest förfinade simuleringen. En vindriktning motsvaras av en grupp av data. Till exempel har första nivån 2 vindriktningar och då får vindriktningen från söder alla riktningar mellan  $90^\circ$  och  $180^\circ$ . Bakomliggande program kalkylerar hur vanligt förekommande vindriktningarna är och därmed kan sannolikheterna för samtliga fastställas. I samma princip som temperaturen kommer vindriktningar även vara avhängiga på vilken tidsperiod som äger rum i scenariot och därför kan en och samma riktning få flera sannolikheter. Figur 9 nedan illustrerar olika antal vindriktningsspänn.



Figur 9 Vindriktningarna visas nedan i ökande antal från 2 till 8.

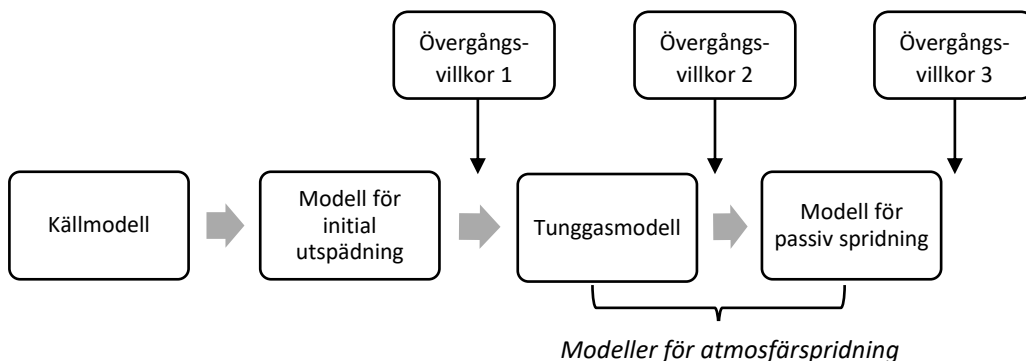
#### 4.3.4 Vindstyrka

Vindstyrkan är relevant att ta hänsyn till då den förekommer frekvent bland uppsättningen av ekvationer. Denna parameter kommer precis som temperaturen få en normalfördelning på grund av att datamängden anses vara erforderligt stor. Se Figur 8 högre upp för normalfördelningen principiella utseende. Samma tillvägagångssätt gäller även för vindstyrkan vars värden får lika procentuella andelar utifrån data från Måseskärs väderleksstation.

### 4.4 Utvärdering av händelsekonsekvenser

#### 4.4.1 Modellkedja för dispersion

FOA-handboken av Fischer et al. (1998) har ett upplag av beräkningsmodeller att tillgå vid spridningsberäkningar avhängigt vilka förhållanden som råder. I Figur 10 nedan, som återskapats från handboken, visas att olika modelltyper kan användas och att övergången från en modell till en annan föregås av övergångsvillkor. Efter en inledande källmodell följer en modell för initial utspädning. Övergångsvillkor 1 blir aktuellt då ett visst avstånd har nåtts. Om avståndet överträds kan det vara aktuellt att därefter använda en tunggasmodell under villkoret att övergångsvillkor 2 inte släpps igenom. Om fallet är sådant kan det bli befogat att använda en modell för passiv spridning. I takt med gasmolnets utbredning blandas luft in och det har inverkan på övergångarna från en modell till en annan. Rapporten använder de två första stegen, källmodell och modell för initial utspädning.



Figur 10 Serie för modelltyper med gränsöverskridande övergångsvillkor.

#### 4.4.2 Gasutströmning

I detta avsnitt visas formler med tillhörande teori som användes för beräkning av gasutsläpp. Materialet hämtades från FOA-handboken (Fischer et al., 1998), om inget annat anges. Fischer et al. (1998) beskriver att gasutströmning innebär att utflödet sker i gasform, exempelvis varm gas eller ånga. För att kritisk strömning ska förekomma, och därmed en uppsättning av ekvationer ska kunna användas, måste villkoret i ekvation 4 undertill stämma. Kritisk strömning innebär att gasen når ljudets hastighet och uppfylls när trycket i behållaren är större än ekvationsuttrycket i högerled.

$$P_0 \geq \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \cdot P_a \quad (\text{Ekvation 4})$$

Där  $P_0$  är trycket inuti behållaren [ $\text{N/m}^2$ ],  $\gamma$  är Poissons kvot [-] och  $P_a$  är atmosfärstryck [ $\text{N/m}^2$ ].

Arean för en cirkel kan beräknas med den vedertagna formeln enligt ekvation 5.

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (\text{Ekvation 5})$$

Där  $A$  är arean för utflödeshållet [ $\text{m}^2$ ] och  $d$  är diametern på hålet [ $\text{m}$ ].

Gaskonstanten beror på delvis på molvikten hos ämnet och kan beräknas med hjälp av ekvation 6.

$$R = \frac{R_*}{m} \quad (\text{Ekvation 6})$$

Där  $R$  är en gaskonstant [ $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ],  $R_*$  är den universella gaskonstanten [ $\text{J/K}$ ] och  $m$  är molvikten för ett ämne [ $\text{kg/kmol}$ ].

Om uttrycken runtom olikheten i ekvation 4 stämmer kan massflödet ut från källan beräknas med efterföljande ekvation 7.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \frac{P_0}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (\text{Ekvation 7})$$

Där  $Q$  är källans massflöde [ $\text{kg/s}$ ],  $C_d$  är en kontraktionsfaktor [-],  $A$  är hålets tvärsnittsarea [ $\text{m}^2$ ],  $P_0$  är trycket inuti behållaren,  $R$  är en gaskonstant [-],  $T_0$  är temperaturen inuti behållaren [ $\text{K}$ ] och  $\gamma$  är Poissons kvot [-].

I utloppet vid kritisk strömning kan det kritiska trycket bestämmas med ekvation 8, se nedan.

$$P_e = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \cdot P_0 \quad (\text{Ekvation 8})$$

Där  $P_e$  är trycket vid utloppet [ $\text{N/m}^2$ ],  $\gamma$  är Poissons kvot [-] och  $P_0$  är trycket inuti behållaren [ $\text{N/m}^2$ ].

Temperaturen i utloppet kan beräknas medelst ekvation 9 då kritisk strömning gäller.

$$T_e = \frac{2}{\gamma + 1} T_0 \quad (\text{Ekvation 9})$$

Där  $T_e$  är temperaturen i utloppet [K],  $\gamma$  är Poissons kvot [-] och  $T_0$  är temperaturen inuti behållaren [K].

Hastigheten i utloppet kan beräknas medelst ekvation 10 då kritisk strömning gäller.

$$u_e = \sqrt{\gamma R T_e} \quad (\text{Ekvation 10})$$

Där  $u_e$  är hastigheten i utloppet [m/s],  $\gamma$  är Poissons kvot [-],  $R$  är en gaskonstant [J/kg·K] och  $T_e$  är temperaturen i utloppet [K].

Även rörelsemängdflöde är en betydande faktor att framräkna vid modellering av gasutsläpp och kan beräknas medelst ekvation 11 undertill. Det förmodas i formeln att gasen betraktas som ideal.

$$F = Q u_e + A_e (P_e - P_a) \quad (\text{Ekvation 11})$$

Där  $F$  är rörelsemängdflödet [N],  $Q$  är källans massflöde [kg/s],  $u_e$  är hastigheten för utflödet [m/s],  $A_e$  är tvärsnittsarean för utloppet [m<sup>2</sup>],  $P_e$  är utloppsstrycket [N/m<sup>2</sup>] och  $P_a$  är atmosfärstrycket [N/m<sup>2</sup>].

#### 4.4.3 Fri cirkulär jet i medvind

I FOA-handboken skriven av Fischer et al. (1998) redovisas bland annat olika modeller för olycksutsläpp. Av modellerna kan man använda en fri cirkulär jet som är en modell för initial utspädning. Vid detta skede är luftens turbulens av mindre betydelse och spridningen beror företrädesvis på källan där utspädningen av ämnet sker mestadels på grund av dess hastighet. Koncentrationerna påverkas därför minimalt av luften runtomkring. I takt med att jetmolnet breddas ut blandas luft in som vid fortsatt utbredning leder till att atmosfären tar hand om spridningen. Molnhastigheten och koncentrationer minskar ständigt med avståndet ifrån källan. Modellen kan betraktas som en cirkulär kon. För att tillämpa jetmodellen är det relevant att innan beräkna massflödet hos källan, men även dragkraft för den. I modellen antas det att utsläppsstället förefaller på den virtuella källpunkten. Vidare förutsätts det negligering av att aerosol avlagras. Dessutom antas det i en fri cirkulär jet att det inte stöts på några hinder på vägen. Ekvationer kopplat till modellen används nedan.

Vid en given koncentration i enheten ppm (parts per million) kan det finnas behov utav att transformera denna till enheten kg/kg. Detta åstadkoms genom användning av ekvation 12 som baseras på en viktning mellan utsläppsgasens och luftens molvikter. Dock används denna ekvation externt från FOA-handboken.

$$\text{ppm till kg/kg} = \frac{c_{ppm} \cdot M_g}{c_{ppm} \cdot M_g + (1 - c_{ppm}) \cdot M_l} \quad (\text{Ekvation 12})$$

Där  $c_{ppm}$  är koncentrationen [ppm],  $M_g$  är molvikten för gasen [kg/kmol] och  $M_l$  är molvikten för luften [kg/kmol].

För att bestämma avståndet till en viss koncentration kan ekvation 13 nedan användas genom att lösa ut avståndet  $x$  ur formeln.

$$Y_c = \frac{5,95Q}{\sqrt{\rho_a(F - Qu_w)}} \cdot \frac{1}{x} \quad (\text{Ekvation 13})$$

Där  $Y_c$  är koncentrationen i centrum för cirkulär jet [kg/kg],  $Q$  är källans massflöde [kg/s],  $\rho_a$  är densiteten för luften [kg/m<sup>3</sup>],  $F$  är rörelsemängdflödet [N],  $u_w$  är hastigheten för vinden [m/s] och  $x$  är avståndet längs med jetaxel sett från källpunkten [m].

Den turbulenta jetens radie bestäms med hjälp av ekvation 14 undertill.

$$R = \frac{0,22x}{\sqrt{1 + \frac{u_w \sqrt{\rho_a} \cdot x}{3,53 \sqrt{F - Qu_w}}}} \quad (\text{Ekvation 14})$$

Där  $R$  är den turbulenta jetens radie [m],  $x$  är avståndet längs med jetaxel sett från källpunkten [m],  $u_w$  är hastigheten för vinden [m/s],  $\rho_a$  densiteten för luften [kg/m<sup>3</sup>],  $F$  är rörelsemängdflödet [N] och  $Q$  är källans massflöde [kg/s].

För att kontrollera hur långt jetmodellen gäller kan en kontroll utföras medelst ekvation 15.

$$x_{tr} = 16 \cdot \frac{\sqrt{F - Qu_w}}{u_w \sqrt{\rho_a}} \quad (\text{Ekvation 15})$$

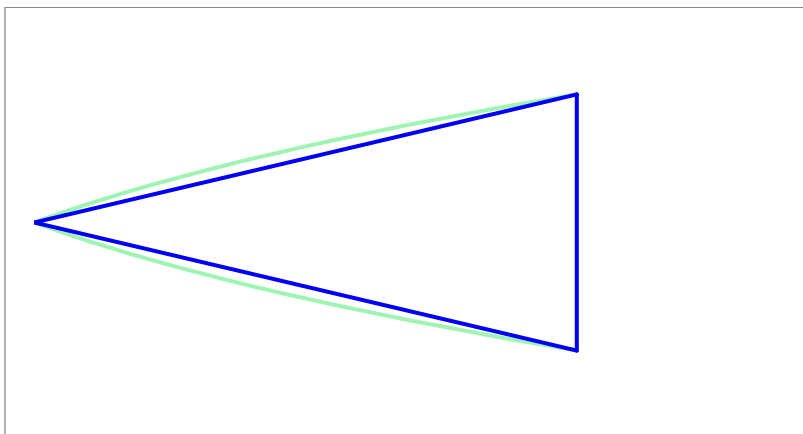
Där  $x_{tr}$  är distansen till en eventuell övergång till atmosfärisk spridning [m],  $F$  är rörelsemängdflödet [N],  $Q$  är källans massflöde [kg/s],  $u_w$  är hastigheten för vinden [m/s] och  $\rho_a$  är densiteten för luften [kg/m<sup>3</sup>].



#### 4.4.4 Händelsekonsekvenser

Rapporten avgränsas alltså till den första delen av modellkedjan i Figur 10, det vill säga källmodell och modell för initial utspädning. Anledningen till att inte flera spridningsmodeller används är på grund av den begränsande tidsramen för projektet och att det nödvändigtvis i första hand inte besvarar syftet bättre. Modellen för initial utspädning är dessutom konservativ på längre avstånd där koncentrationer överskattas (Fischer et al., 1998). Således kommer denna modell att tas till bruk. Det går att använda ingående modeller för initial utspädning. Till undersökningen väljs det att tillämpa en jetmodell, som Fischer et al. (1998) presenterar, närmare bestämt väljs en fri cirkulär jet i medvind som det redogjordes för tidigare.

För att kunna utvärdera olycksscenarierna modelleras gasmolnets radiella utbredning medelst ekvation 14 ovan. I Figur 11 visas gasmolnets utbredning i grön färg som utformas med hjälp av ekvationen. I syfte att underlätta hanteringen av geometrier i programmet med efterkommande överlappningar görs det medvetna valet att låta formen bli en triangel som åskådliggörs i Figur 11 med blå färg. Därutav kan tre räta linjer bestämmas av programmet. Poängterbart är att spridningsarean blir mindre som kan uttydas mellan blått och grönt område. Å andra sidan kan det resoneras att den yttre skillnaden i area, mellan grön och blå inneslutning, motsvarar ett litet område samt att personer där har kortare väg till säkrare område. I den förenklade spridningstriangeln, den blåa färgen, antas att samtliga människor omkommer vid ammoniakkoncentrationen 4500 ppm. Denna koncentration beräknas längst bort i centrum i den blåa triangeln och antas också gälla för ytterkanterna längst bort.

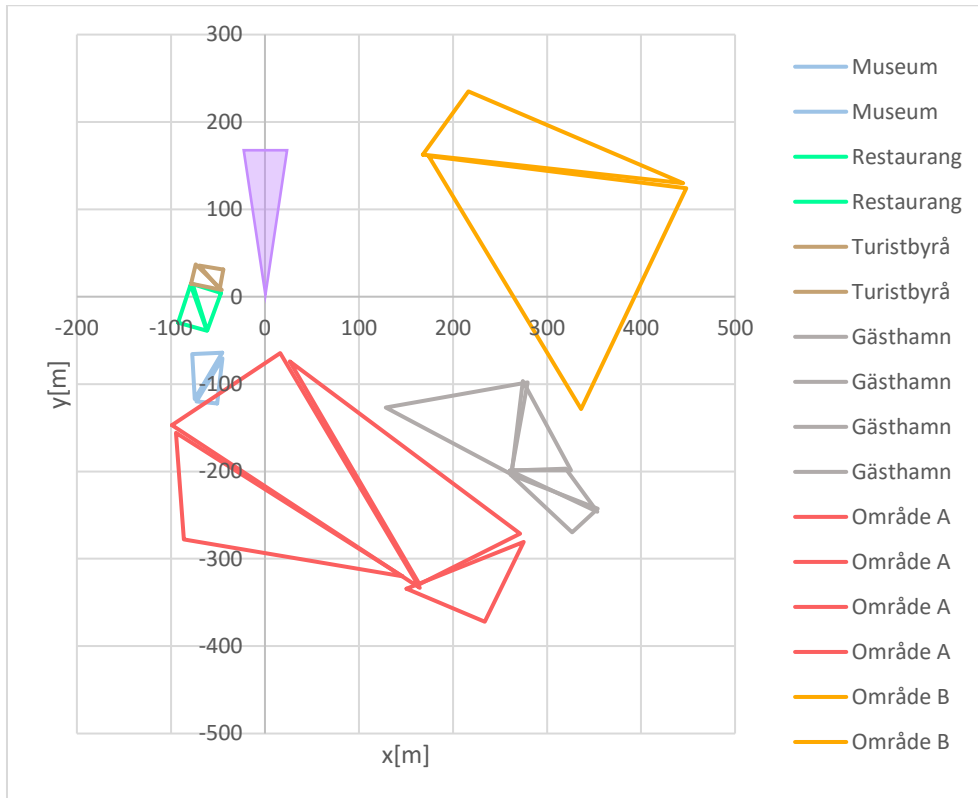


Figur 11 Figur över spridningssektion (grön) och dess approximation (blå).

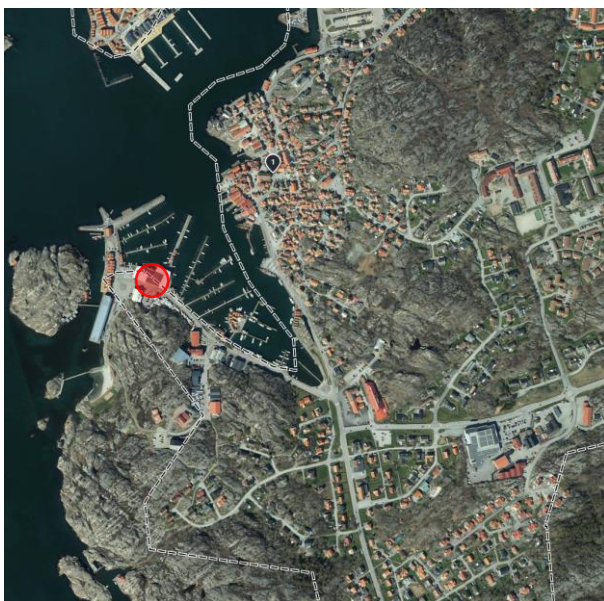
Det som bland annat motiverar att det går att använda FOA-handbokens handberäkningsekvationer är på grund av att Skärhamnsanalysen har jämfört sin modell med dem och det visar sig att resultaten är snarlika (Haeffler et al., 2000). Fördelen med ekvationerna från FOA-handboken är att det blir enklare att fastställa vilka koncentrationer man ska använda. Det är bland annat ett skäl till att handbokens modeller är aktuella i detta sammanhang där efterkommande många scenarier förväntas bli beräkningsintensiva samtidigt som tänkt program ska väva samman beräkningsgångar på ett smidigt sätt.

Händelsekonsekvenserna beräknas i slutändan genom att datorprogrammet beräknar en överlappande polygonarea mellan gastriangeln, blå triangel i Figur 11, och utsatta populationsgeometrier, i Figur 12, där alla i den inneslutna arean förväntas omkomma. Utrymning av berörda områden är inget som beaktas i rapporten. I Figur 12 framhävs vilka populationsområden som användes och de ritades in i form av trianglar i programmet. Det förtydligas att populationstrianglarna inte ska förväxlas med den blåa gasspridningstriangeln från origo. Populationstrianglarna är utritade i olika färger, där en särskild färg avses för ett visst typ av område. Till exempel innebär det att restaurangen i Figur 12 utgörs sammantaget av de två gröna trianglarna. I områden som inte är markerade antas det inte finnas någon population. De markerade områdena täcker inte hela Skärhamnsytan, utan analysen utför en förenklad

version då det inte anses vara nödvändigt att täcka allt för att bättre undersöka syftet. Till följd blir område A och område B mindre i storlek i Figur 12. Då målet inte är att exakt återskapa den andra Skärhamnsanalysen kommer inte personantalen anpassas i dessa förminskade områden. Ett annat argument till att området begränsas till industrins närhet runtom origo är att jetmodellen inte räcker hur långt som helst där överkonservativa koncentrationer kan uppstå på längre avstånd. Likväl visar rapportens simuleringar att gastriangeln blir till synes onaturligt långsmal på stora avstånd. I Figur 13, under den grafiska kartan, visas en vanlig kartbild över området.



Figur 12 Grafisk karta över sex populationsområden där varje område har en särskild färg. Ammoniakanläggningen befinner sig i origo. Den lila triangeln visar ett utsläpp från origo.



Figur 13 Geografisk karta över området.

Befolkningsstätheterna kommer att kopplas till tiden där en annan tidpunkt på dygnet kan leda till andra populationsantal runtom verksamheten. Det betyder också att fler tidsperioder i en nivå leder till finare fördelning i ett populationsområde, eftersom då modelleras flera olika populationsantal beroende på vilken tid på dygnet det är. För samtliga studerade områden listas först populationsantalet ut för den finaste nivån, som i rapporten motsvarar fyra tidsperioder. Tillämpade data hämtas från Skärhamnsanalysen (Haeffler et al., 2000), och används delvis i modifierad tappning på grund av det reducerade kartområdet, se Tabell 10-Tabell 15 nedan.

Anledningen till att dessa fyra tidsperioder redovisas först är att denna analys utgår från dem. I nästa skede kommer dessa tidsperioder att användas för att beräkna grövre tidsperioder med mindre fina populationsantal. Således redovisas tidsperiodernas fördelning omvänt, från finaste nivån till grövsta, det vill säga från nivå 3 till nivå 1.

Arean för samtliga populationstrianglar för varje område beräknas och därefter med hjälp av populationsantalet kan samtliga populationstätheter fastställas genom att dividera populationsantalet med den totala arean för ett område. Noterbart är att populationsantalet gäller för den totala triangelarean för ett område. Till exempel för området museum gäller populationsantalet för den sammantagna arean för de två gröna trianglarna. Det är vidare värt att poängtera att alla dödsfall från ett spridningsutsläpp i en viss riktning kumuleras oavsett hur många olika befolkningsområden som täcks.

Tabell 10 Populationsantal för museum, nivå 3.

Museum	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	98
Sommar-Natt	0
Vinter-Dag	33
Vinter-Natt	0

Tabell 11 Populationsantal för turistbyrå, nivå 3.

Turistbyrå	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	5
Sommar-Natt	0
Vinter-Dag	2
Vinter-Natt	0

Tabell 12 Populationsantal för restaurang, nivå 3.

Restaurang	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	20
Sommar-Natt	0
Vinter-Dag	8
Vinter-Natt	0

Tabell 13 Populationsantal för gästhamn, nivå 3.

Gästhamn	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	171
Sommar-Natt	133
Vinter-Dag	0
Vinter-Natt	0

Tabell 14 Populationsantal för område A, nivå 3.

Område A	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	125
Sommar-Natt	153
Vinter-Dag	125
Vinter-Natt	153

Tabell 15 Populationsantal för område B, nivå 3.

Område B	
Tidsperiod	Antal
Sommar-Dag	190
Sommar-Natt	251
Vinter-Dag	190
Vinter-Natt	251

För den näst lägsta nivån av noggrannhet, innehållande två tidsberoende populationsantal per område, beräknas populationsantalen ut genom att nyttja sannolikheterna som finns i Tabell 9 som används till viktade medelvärden på ovanstående populationsantal i nivå 3. Det ger upphov till grövre populationsantal och redovisas i Tabell 16-Tabell 21 i avrundad form som nivå 2.

Tabell 16 Populationsantal för museum, nivå 2.

Museum	
Tidsperiod	Antal
Sommar	12,3
Vinter	12,4

Tabell 17 Populationsantal för turistbyrå, nivå 2.

Turistbyrå	
Tidsperiod	Antal
Sommar	0,63
Vinter	0,75

Tabell 18 Populationsantal för restaurang, nivå 2.

Restaurang	
Tidsperiod	Antal
Sommar	2,5
Vinter	3

Tabell 19 Populationsantal för gästhamn, nivå 2.

Gästhamn	
Tidsperiod	Antal
Sommar	38
Vinter	0

Tabell 20 Populationsantal för område A, nivå 2.

Område A	
Tidsperiod	Antal
Sommar	34,8
Vinter	104,3

Tabell 21 Populationsantal för område B, nivå 2.

Område B	
Tidsperiod	Antal
Sommar	55,1
Vinter	165,4

För den lägsta nivån av noggrannhet nivå 1, innehållande ett tidsberoende populationsantal per område, beräknas populationsantalen ut genom att nyttja sannolikheterna som finns i Tabell 8 som används till viktade medelvärden på ovanstående populationsantal i nivå 2. Det ger upphov till grövre populationsantal och redovisas i Tabell 22-Tabell 27 i avrundad form som nivå 1.

Tabell 22 Populationsantal för museum, nivå 1.

Museum	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	12,3

Tabell 23 Populationsantal för turistbyrå, nivå 1.

Turistbyrå	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	0,7

Tabell 24 Populationsantal för restaurang, nivå 1.

Restaurang	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	2,9

Tabell 25 Populationsantal för Gästhamn, nivå 1.

Gästhamn	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	9,5

Tabell 26 Populationsantal för område A, nivå 1.

Område A	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	86,9

Tabell 27 Populationsantal för område B, nivå 1.

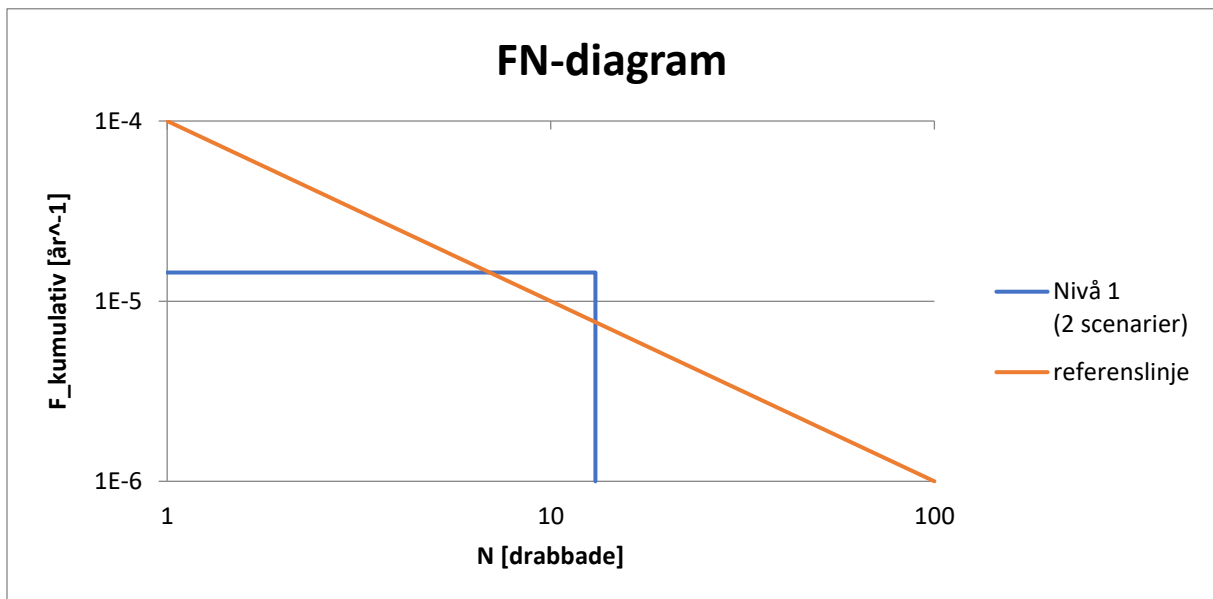
Område B	
<b>Tidsperiod</b>	<b>Antal</b>
Hela året	137,8

## 5 Resultat

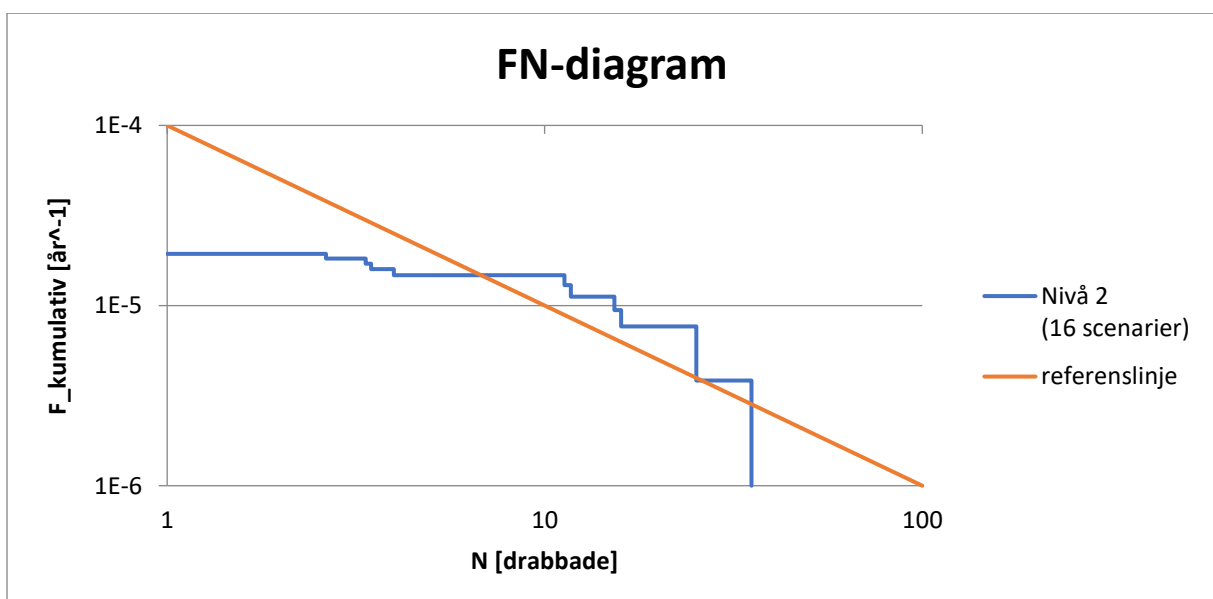
Totalt studeras tre frågeställningar med hjälp av två undersökningsmetodiker. Därför kommer resultatet att delas upp i två delar med beteckningarna: ”successivt utökad antal scenarier” och ”parameterkänslighet”.

### 5.1 Successivt utökad antal scenarier

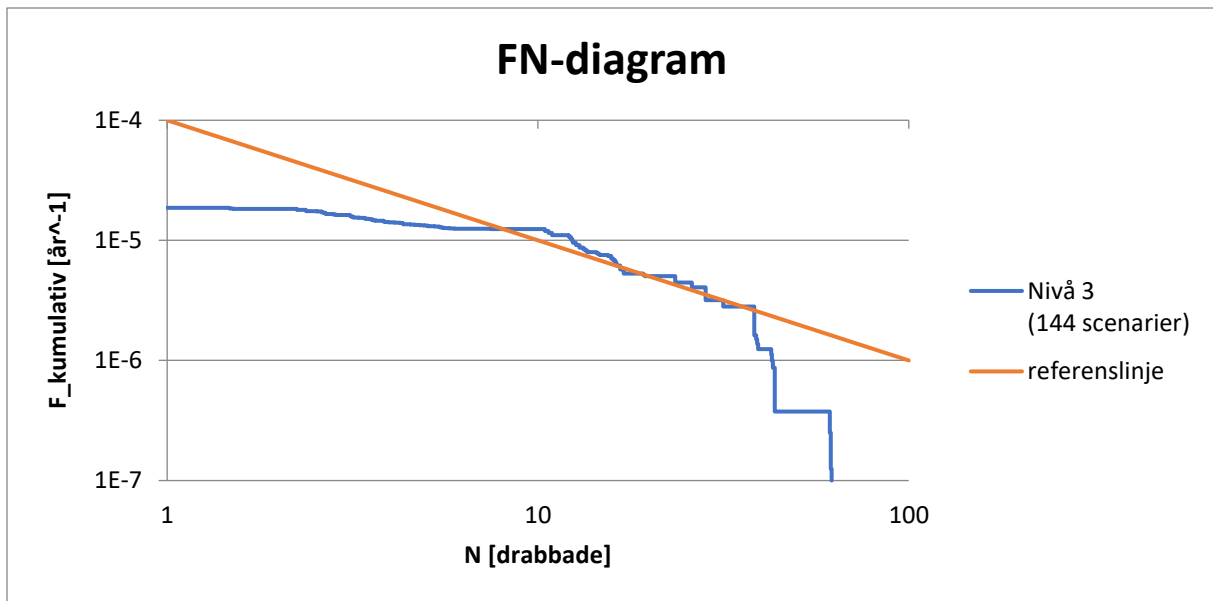
I denna del visas resultat med successivt utökad antal scenarier. Först presenteras FN-kurvorna, se Figur 14-Figur 19. Sedan visas riskmåten i absoluta respektive relativa tal, se Figur 20-Figur 25.



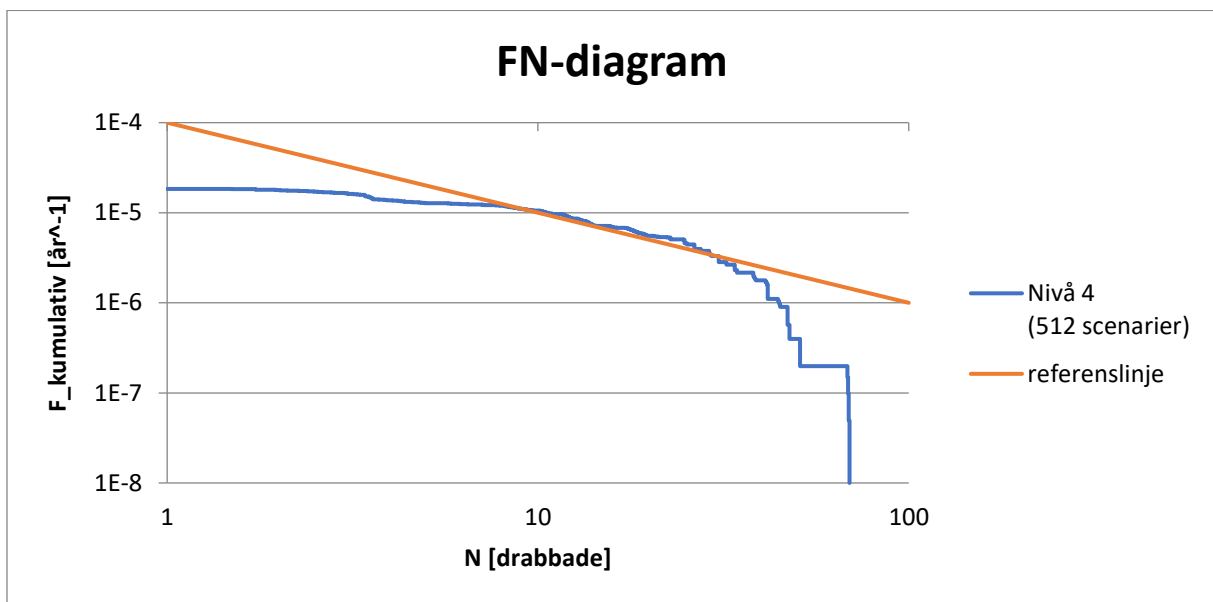
Figur 14 FN-kurva vid nivå 1 med 2 scenarier.



Figur 15 FN-kurva vid nivå 2 med 16 scenarier.

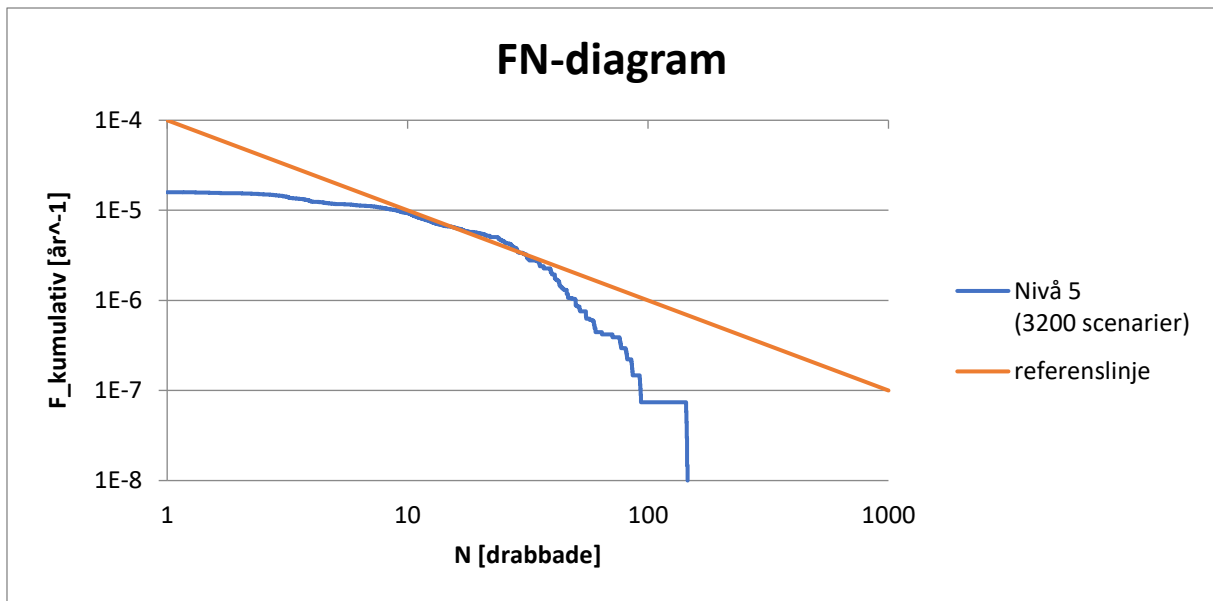


Figur 16 FN-kurva vid nivå 3 med 144 scenarier.

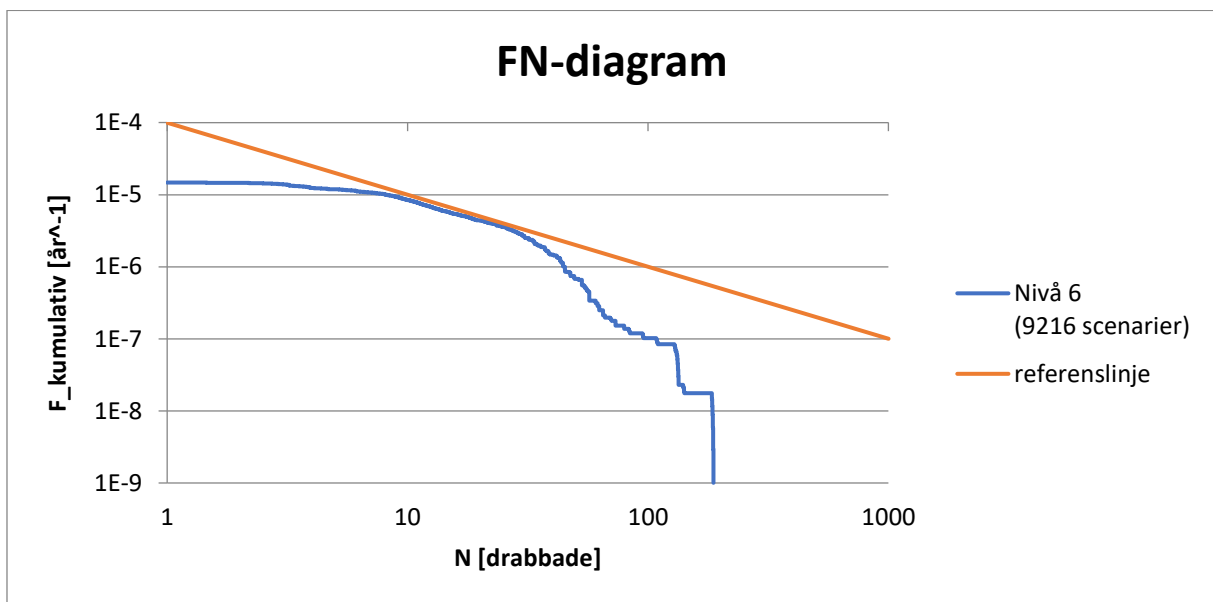


Figur 17 FN-kurva vid nivå 4 med 512 scenarier.

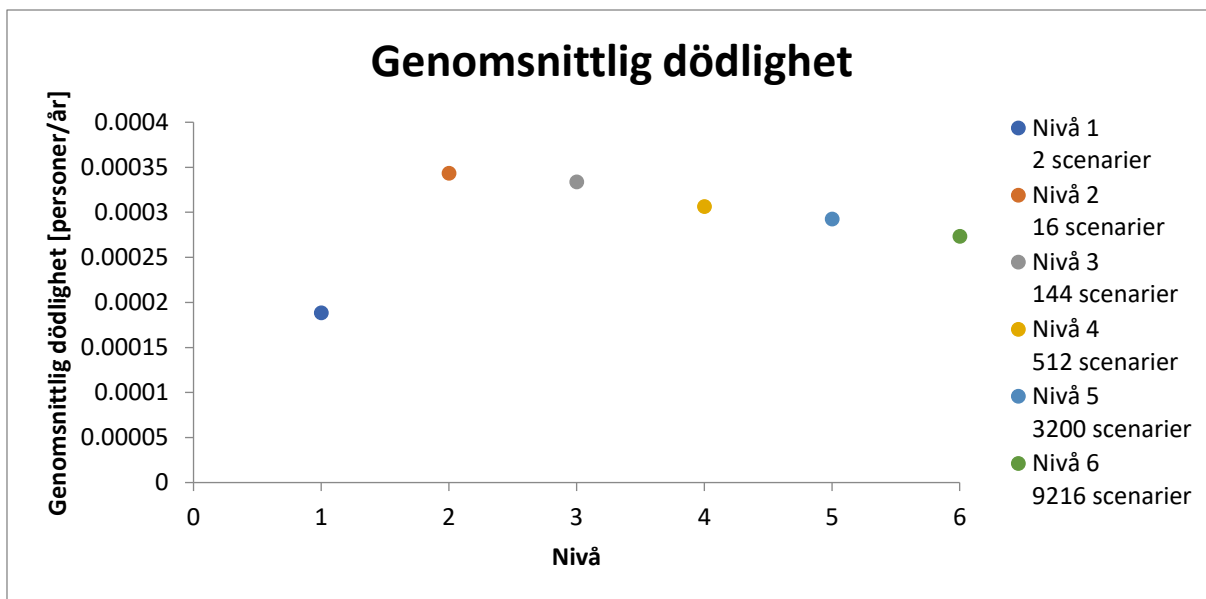




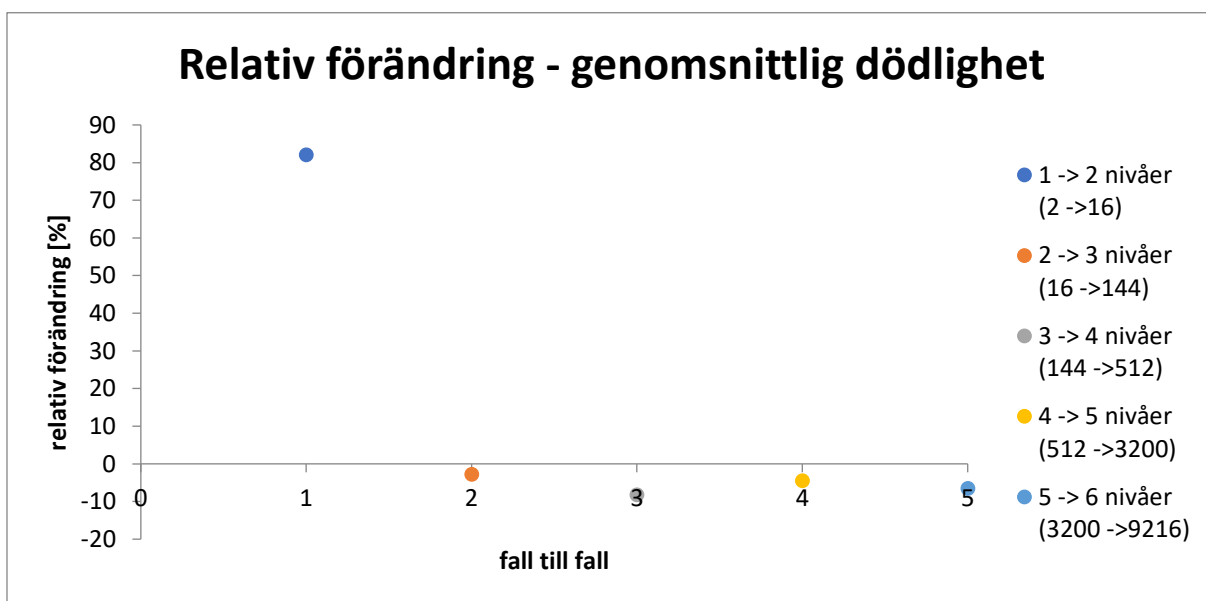
Figur 18 FN-kurva vid nivå 5 med 3200 scenarier.



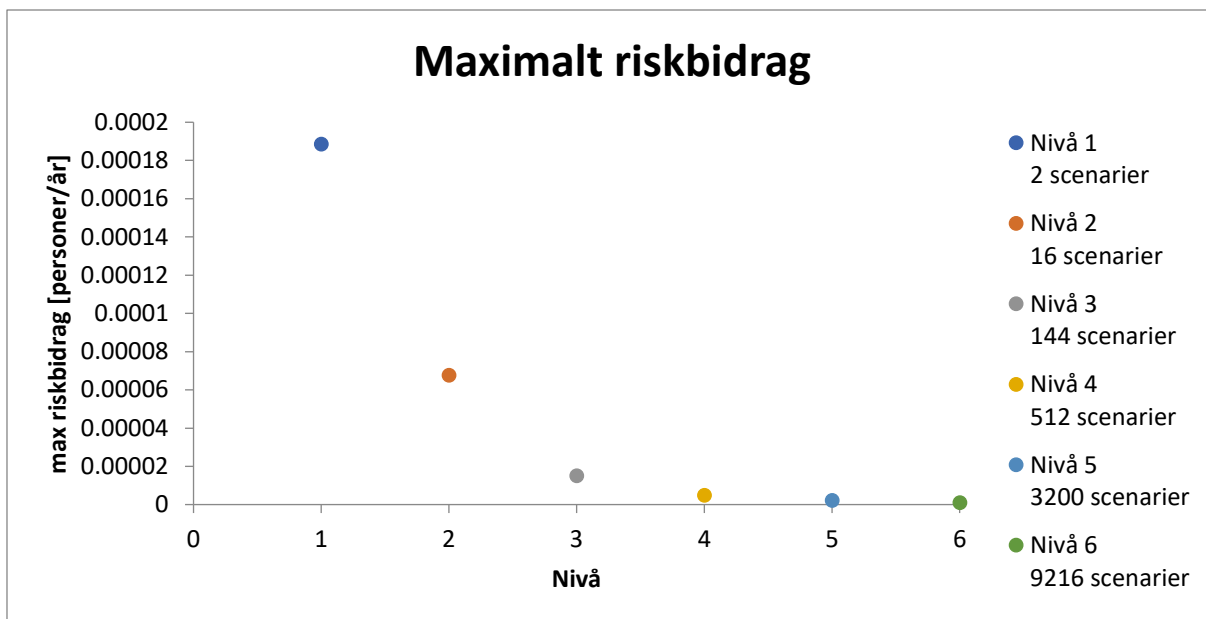
Figur 19 FN-kurva vid nivå 6 med 9216 scenarier.



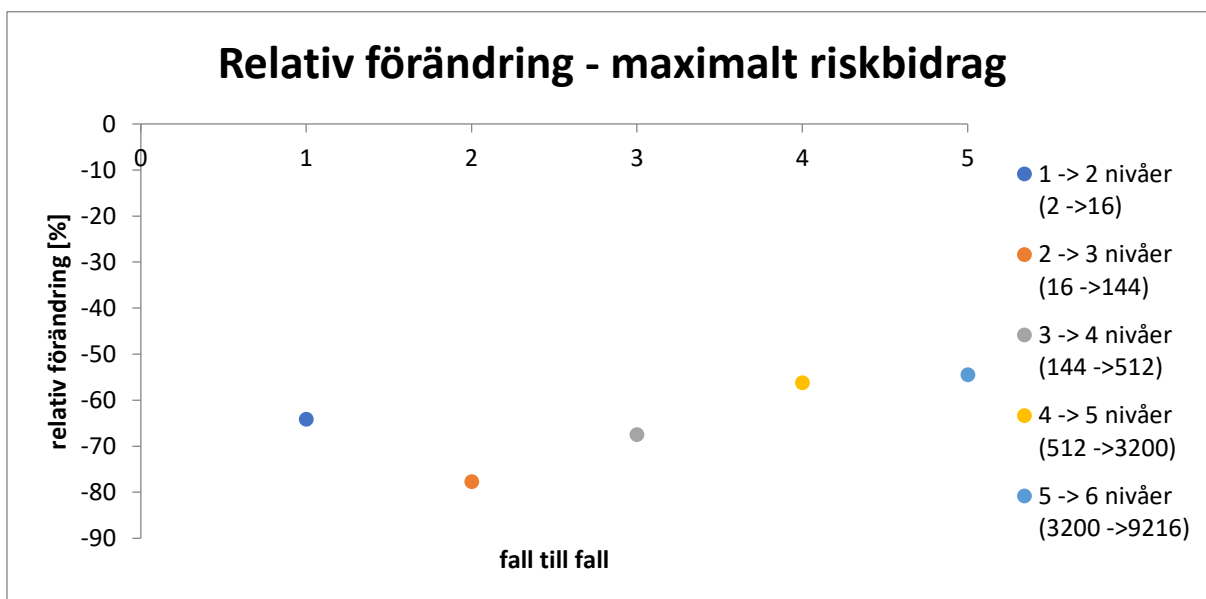
Figur 20 Genomsnittlig dödlighet i absoluta tal för nivå 1-6. För varje nivå simulerades ett visst antal scenarier som visas i högra delen av figuren. Utifrån nivån visas värdet på genomsnittlig dödlighet.



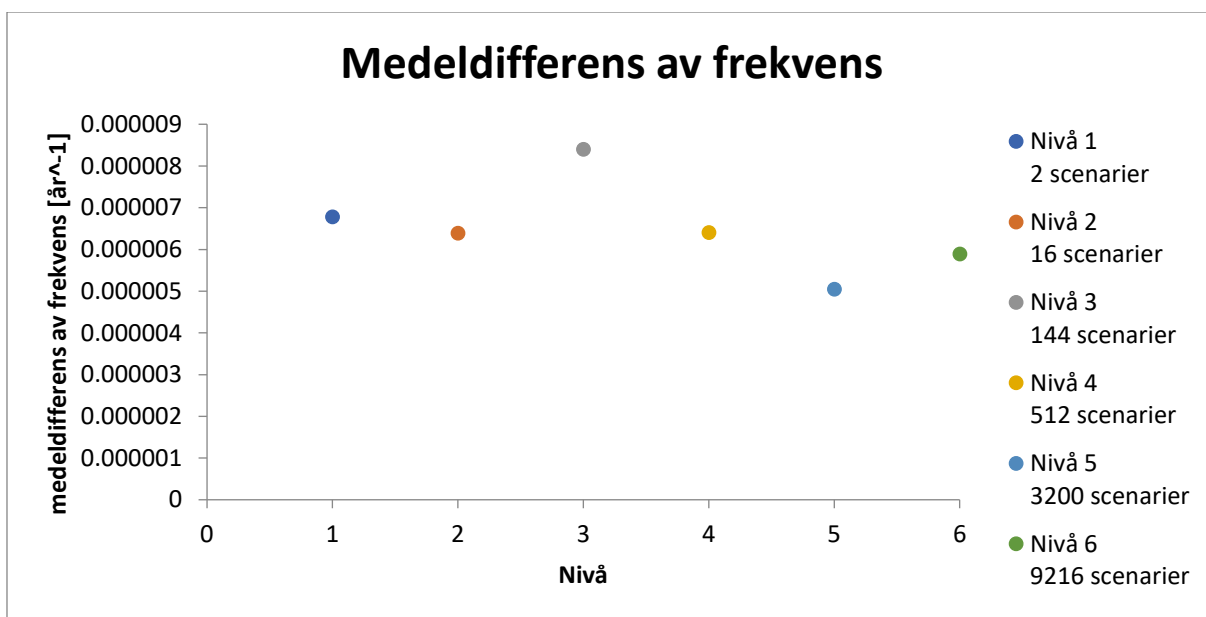
Figur 21 Genomsnittlig dödlighet i relativa tal mellan nivåerna. Varje punkt visar hur mycket genomsnittlig dödlighet procentuellt ändras från en nivå till en högre som visas i punktförklaringarna till höger. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



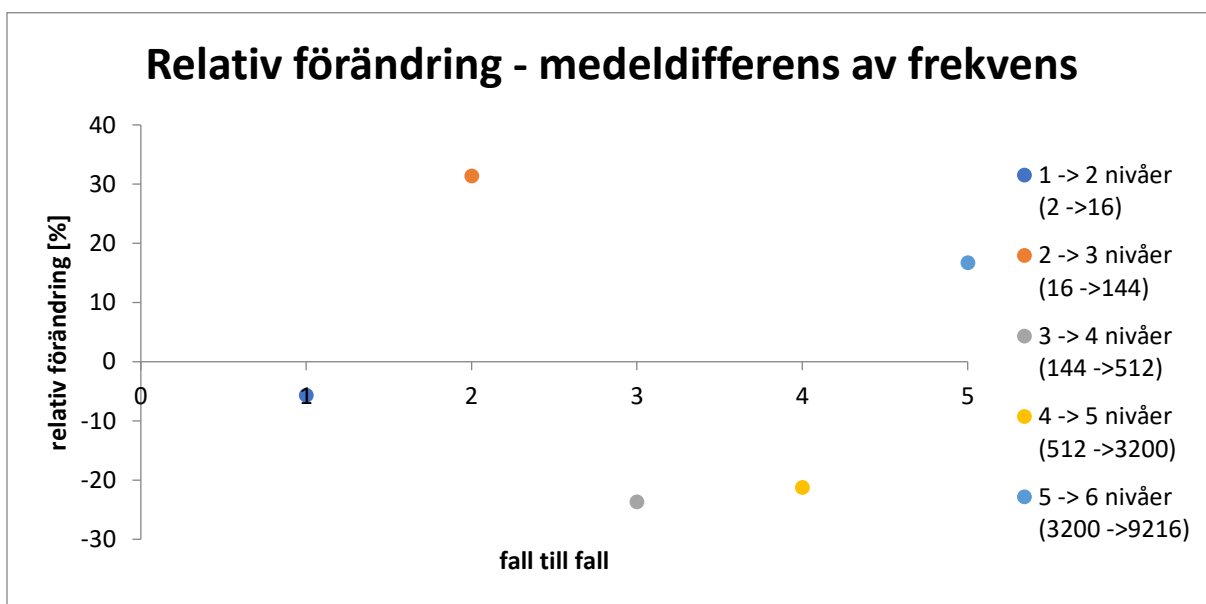
Figur 22 Maximalt riskbidrag i absoluta tal för nivå 1-6. För varje nivå simulerades ett visst antal scenarier som visas i högra delen av figuren. Utifrån nivån visas värdet på maximalt riskbidrag.



Figur 23 Maximalt riskbidrag i relativa tal mellan nivåerna. Varje punkt visar hur mycket maximalt riskbidrag procentuellt ändras från en nivå till en högre som visas i punktförklaringarna till höger. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



Figur 24 Medeldifferens av frekvens i absoluta tal för nivå 1-6. För varje nivå simulerades ett visst antal scenarier som visas i högra delen av figuren. Utifrån nivån visas värdet på medeldifferens av frekvens.



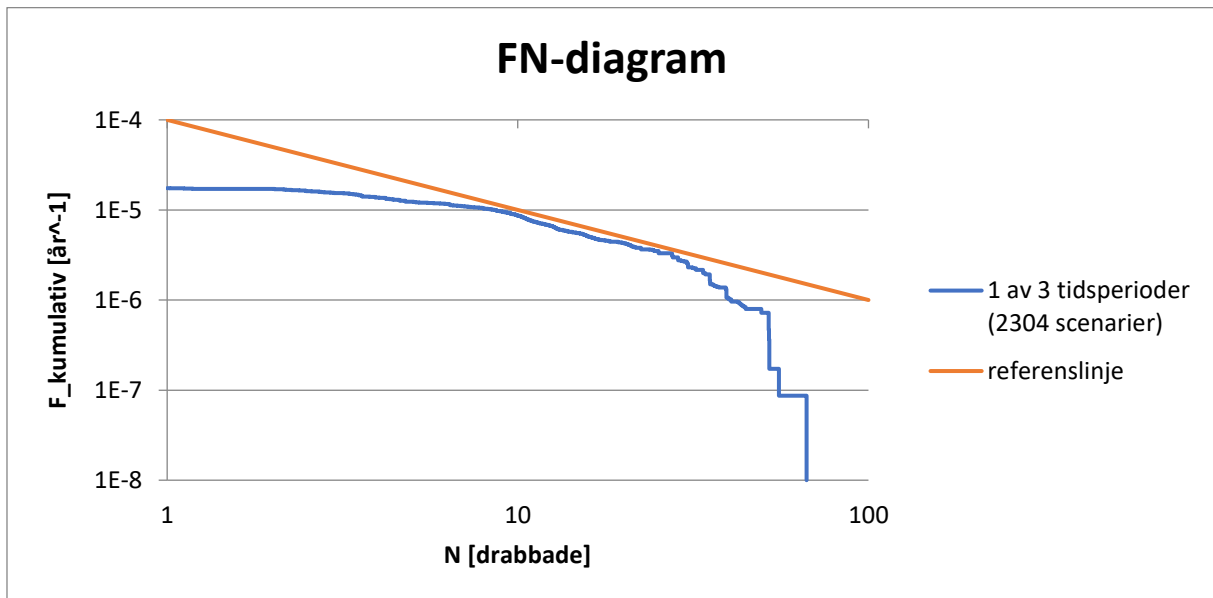
Figur 25 Medeldifferens av frekvens i relativa tal mellan nivåerna. Varje punkt visar hur mycket medeldifferens av frekvens procentuellt ändras från en nivå till en högre som visas i punktförklaringarna till höger. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

## 5.2 Parameterkänslighet

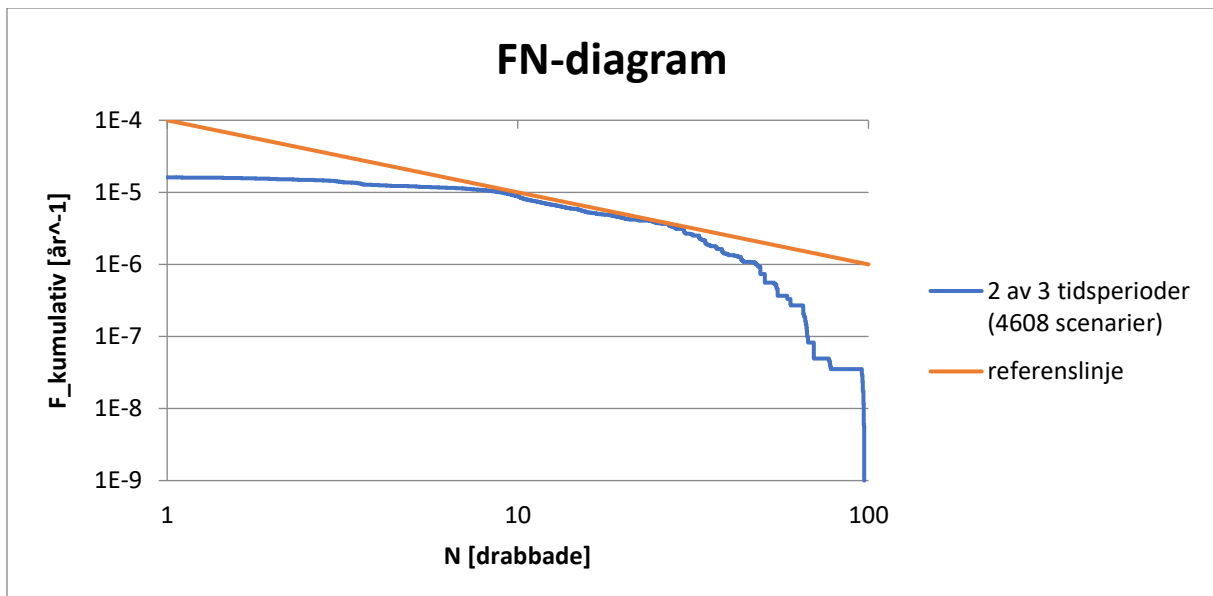
I denna del visas resultat avseende känslighet/upptrappning för samtliga parametrar: tidsperiod, temperatur, vindriktning och vindstyrka. Alla parametrars noggrannheter befinner sig på den högsta nivån förutom parametern som studeras som trappas upp stegvis från den lägsta nivån till den högsta.

### 5.2.1 Tidsperiod

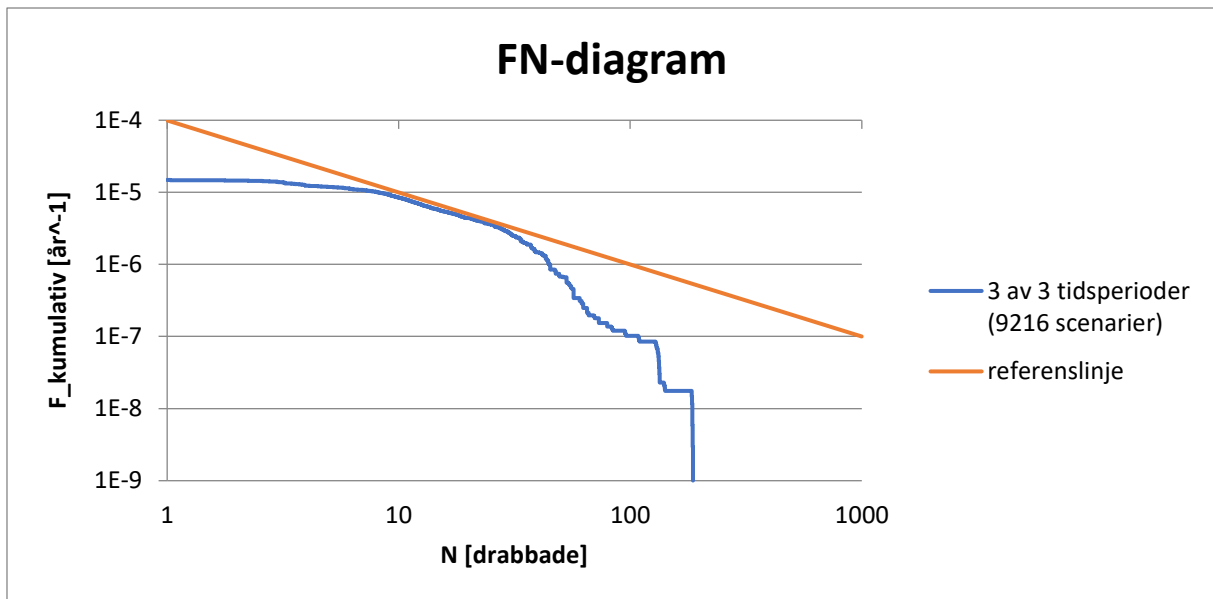
Först presenteras FN-kurvorna, se Figur 26-Figur 28. Sedan visas riskmåten i relativa tal, se Figur 29-Figur 31.



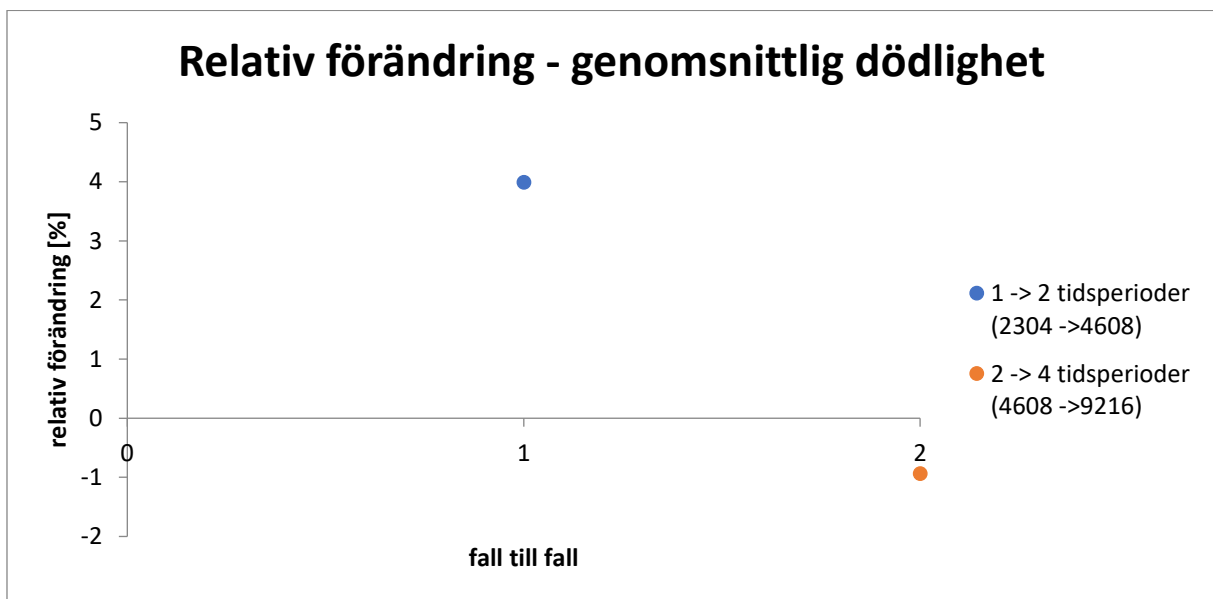
Figur 26 Parameterupptrappning 1 av 3 för parametern tidsperiod.



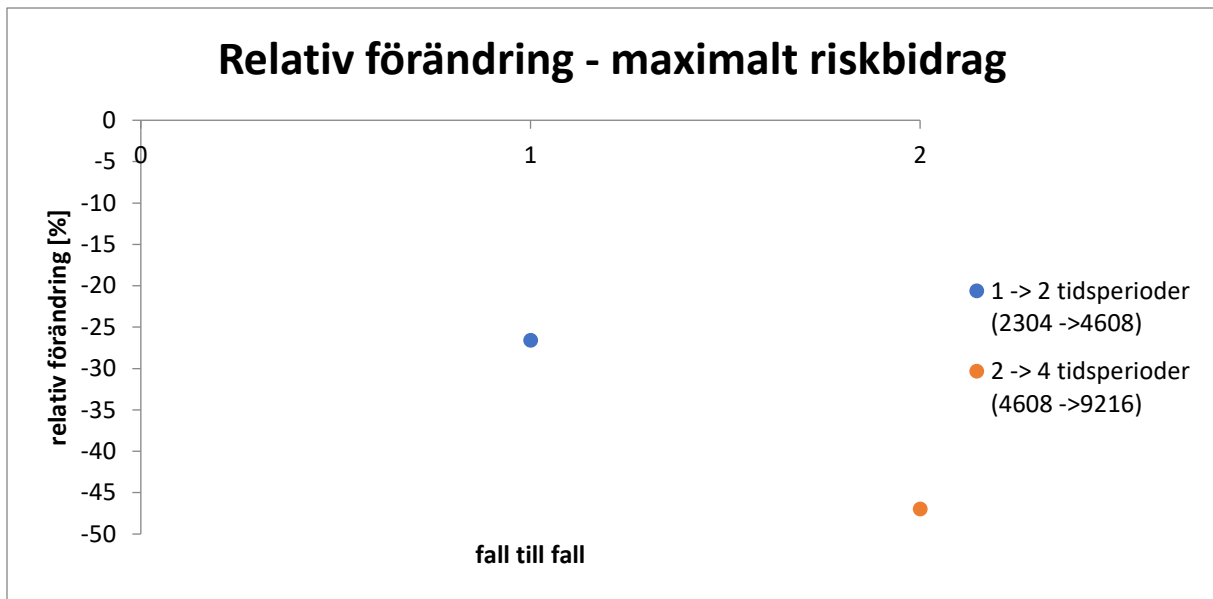
Figur 27 Parameterupptrappning 2 av 3 för parametern tidsperiod.



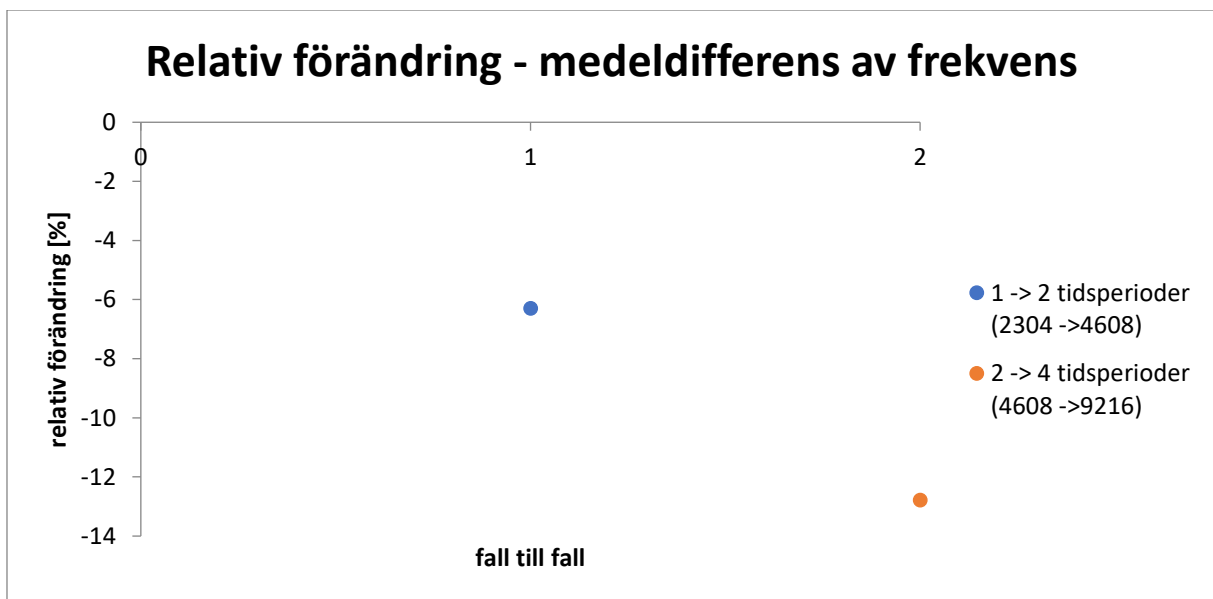
Figur 28 Parameterupptrappning 3 av 3 för parametern tidsperiod.



Figur 29 Genomsnittlig dödlighet i relativa tal mellan nivåerna för parametern tidsperiod. Varje punkt visar hur mycket genomsnittlig dödlighet procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



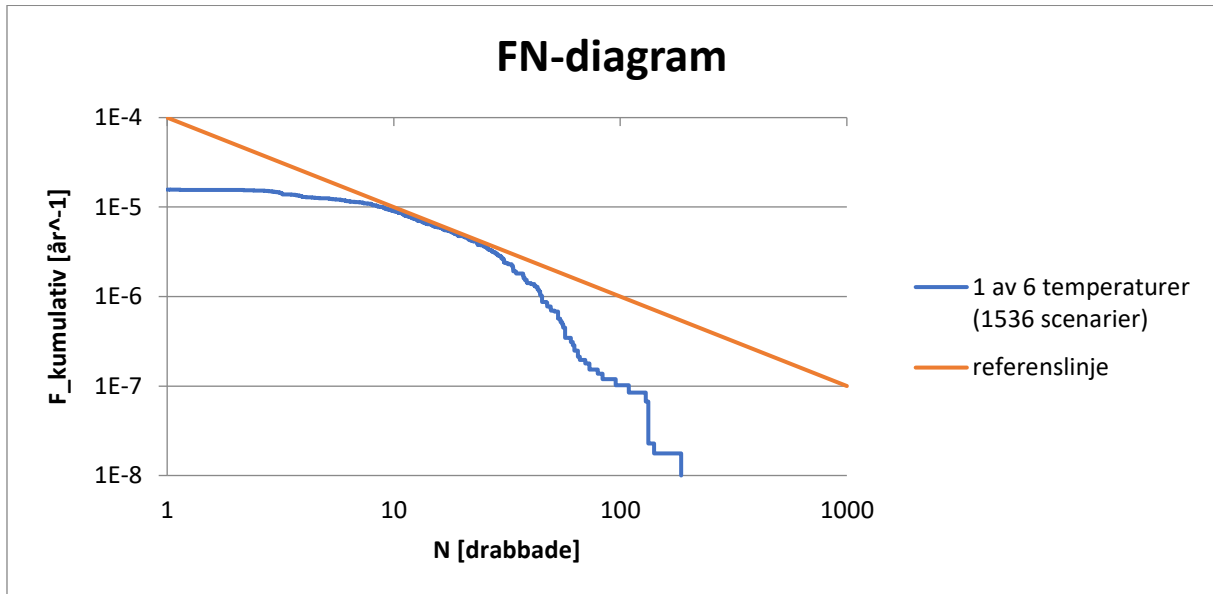
Figur 30 Maximalt riskbidrag i relativa tal mellan nivåerna för parametern tidsperiod. Varje punkt visar hur mycket maximalt riskbidrag procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



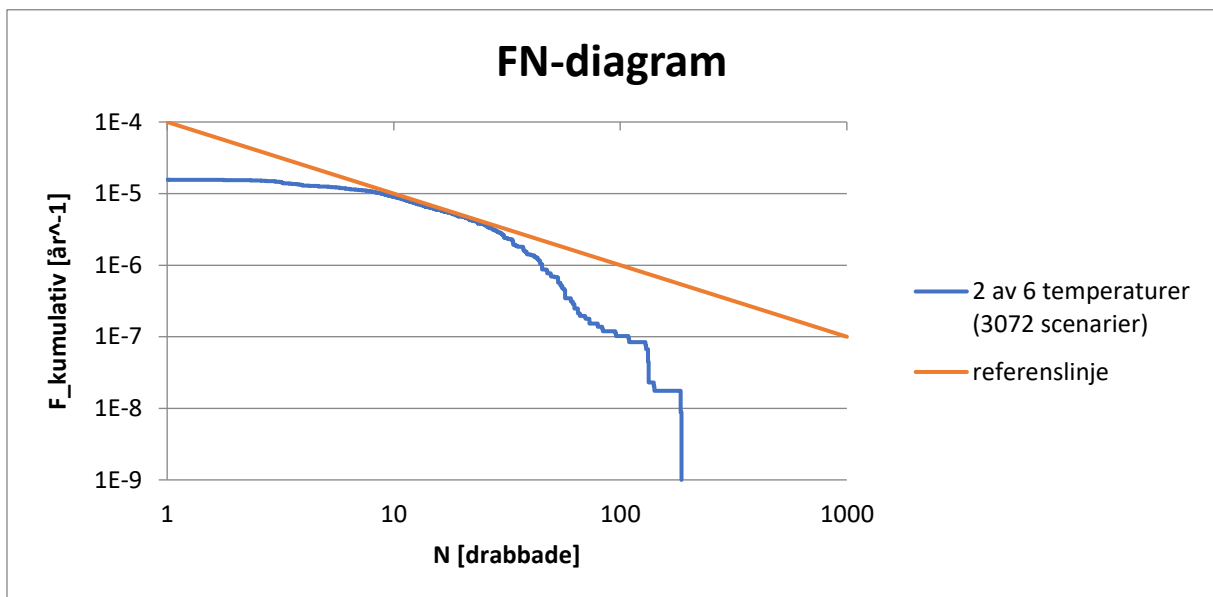
Figur 31 Medeldifferens av frekvens i relativa tal mellan nivåerna för parametern tidsperiod. Varje punkt visar hur mycket medeldifferens av frekvens procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

### 5.2.2 Temperatur

Först presenteras FN-kurvorna, se Figur 32-Figur 37. Sedan visas riskmåten i relativa tal, se Figur 38-Figur 40.

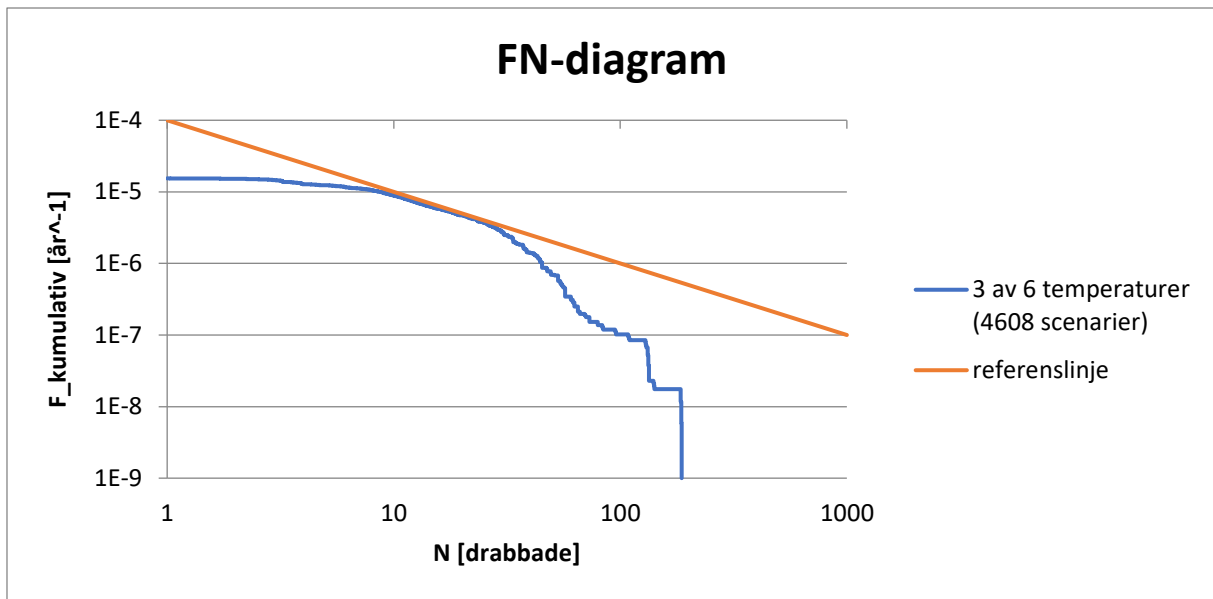


Figur 32 Parameterupptrappning 1 av 6 för parametern temperatur.

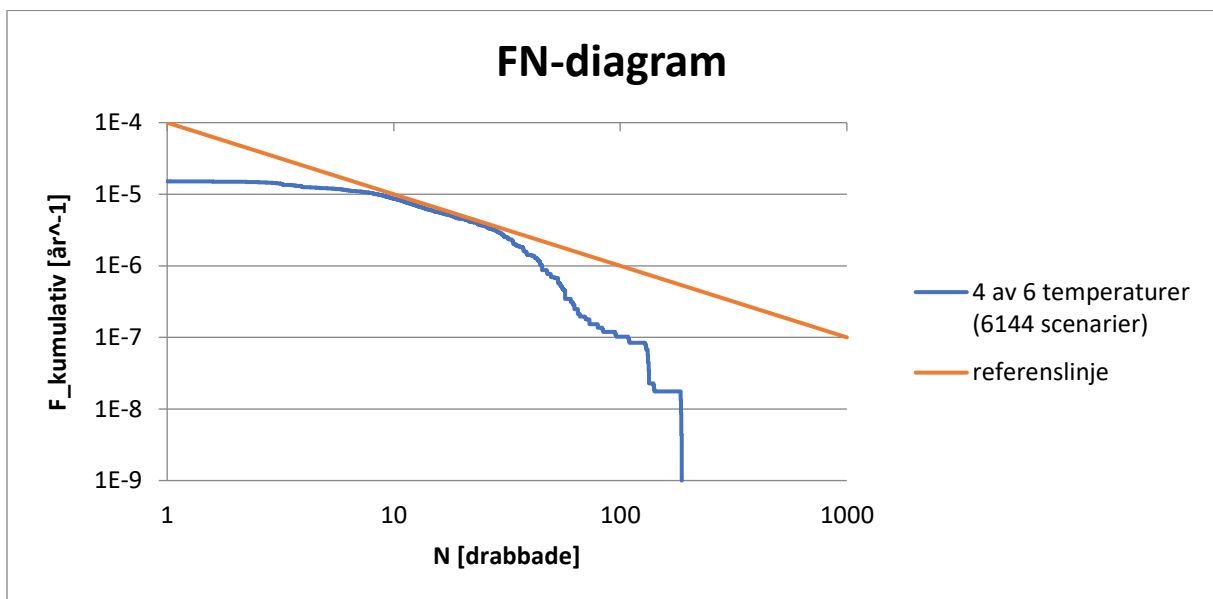


Figur 33 Parameterupptrappning 2 av 6 för parametern temperatur.

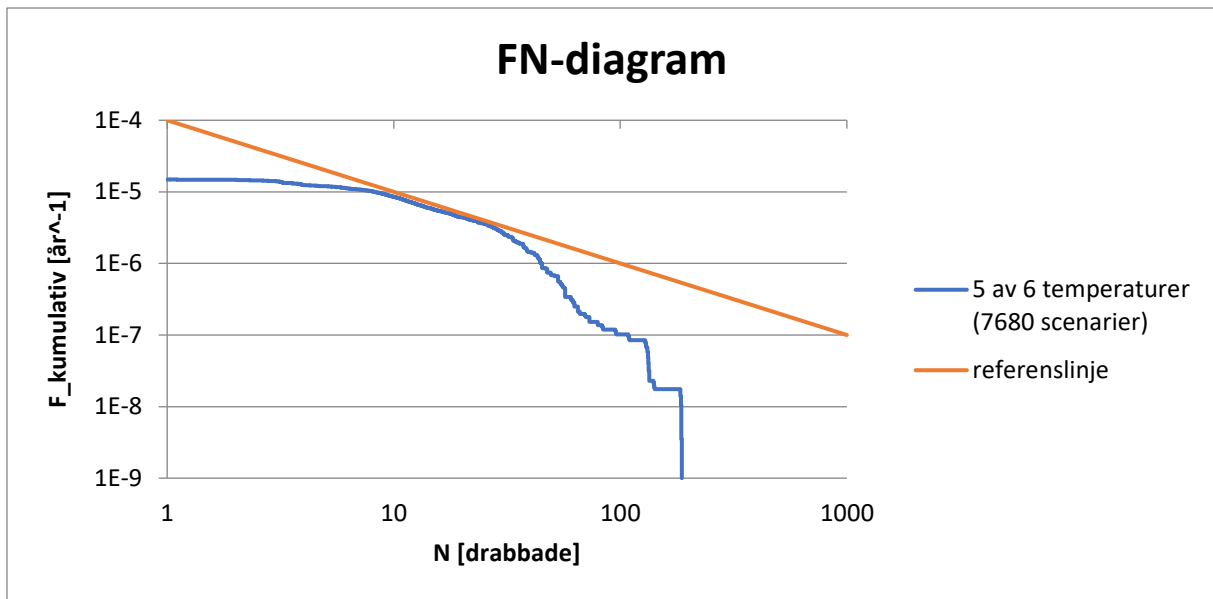




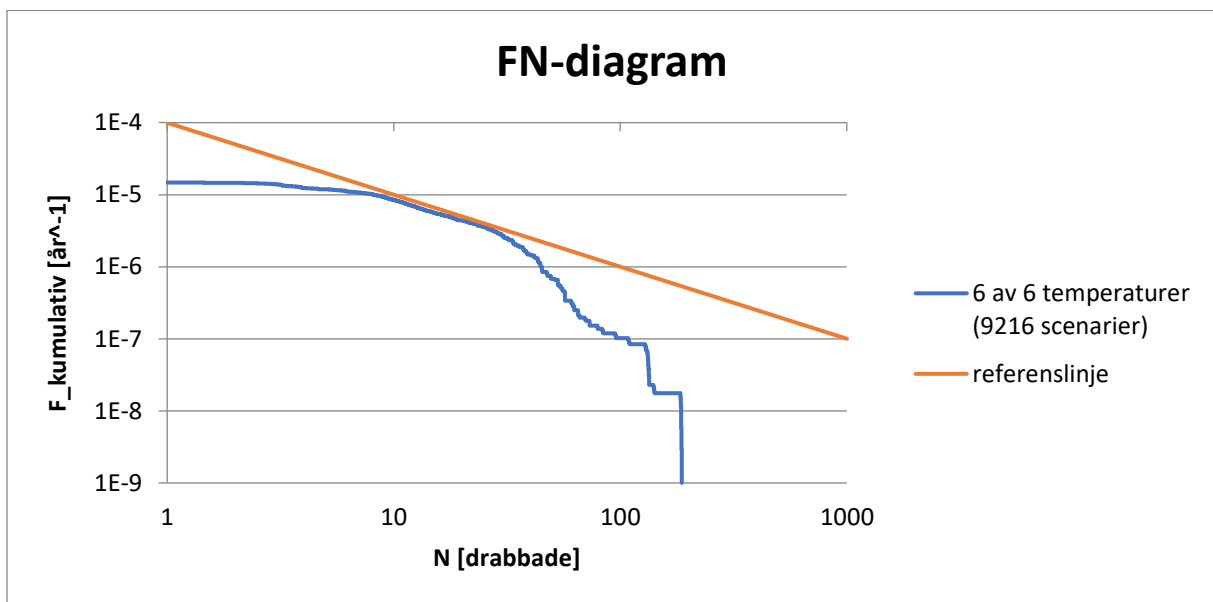
Figur 34 Parameterupptrappning 3 av 6 för parametern temperatur.



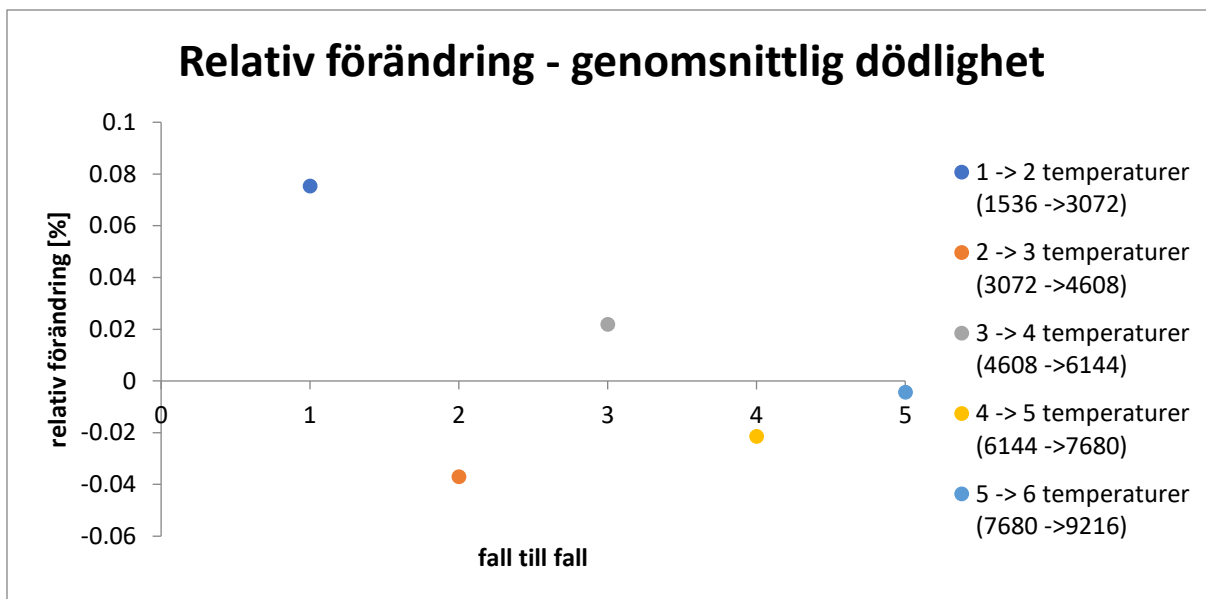
Figur 35 Parameterupptrappning 4 av 6 för parametern temperatur.



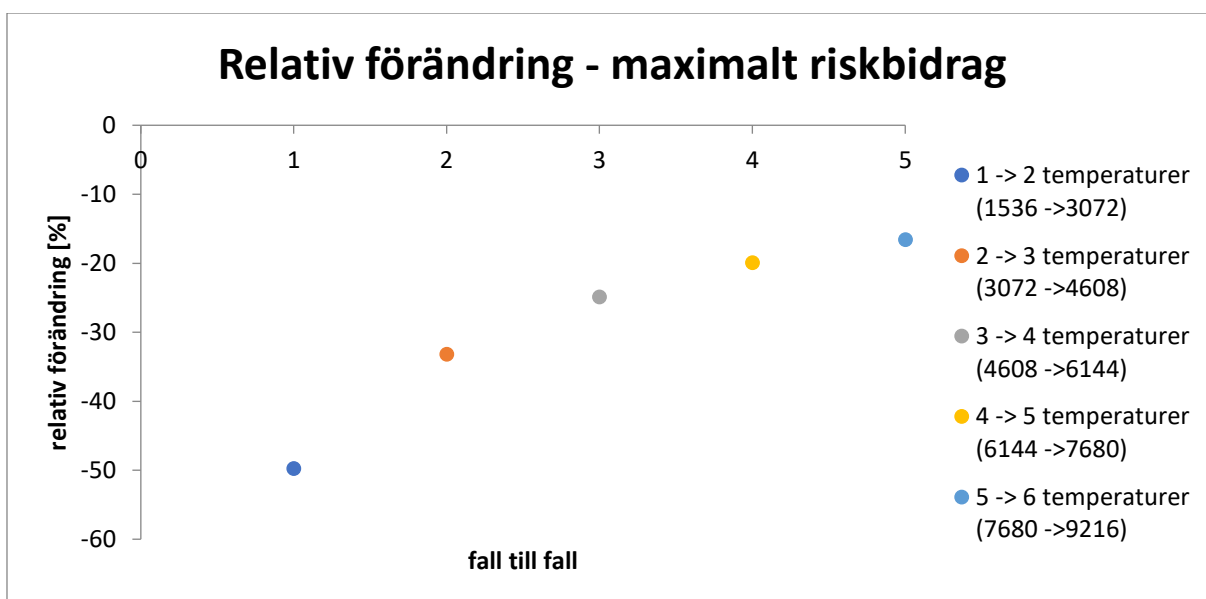
Figur 36 Parameterupptrappning 5 av 6 för parametern temperatur.



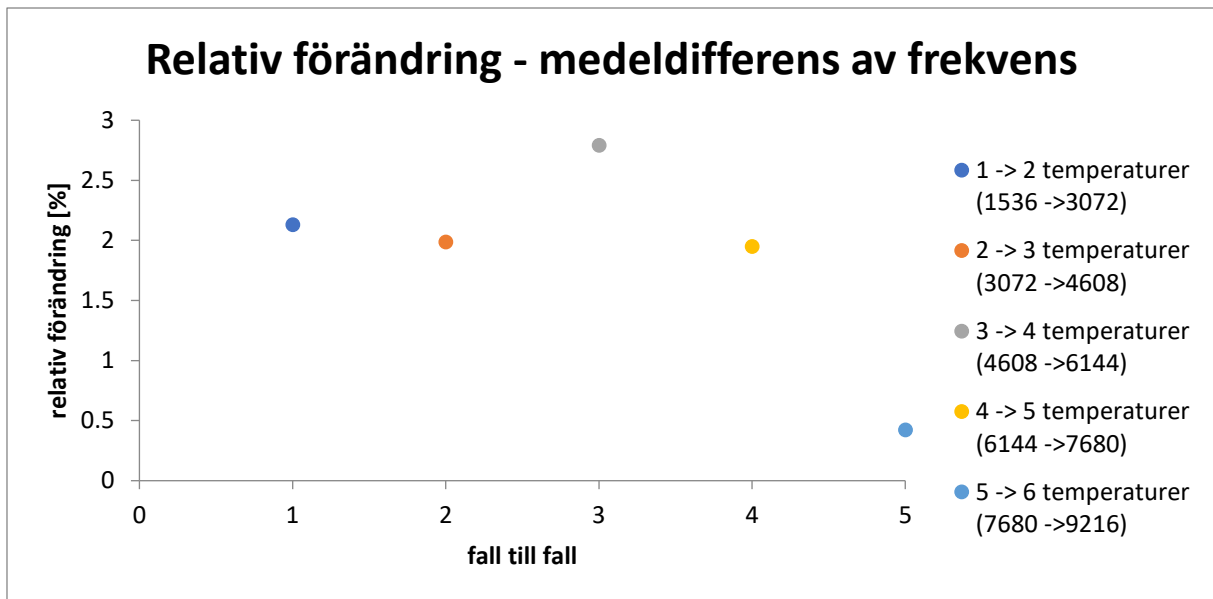
Figur 37 Parameterupptrappning 6 av 6 för parametern temperatur.



Figur 38 Genomsnittlig dödlighet i relativa tal mellan nivåerna för parametern temperatur. Varje punkt visar hur mycket genomsnittlig dödlighet procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



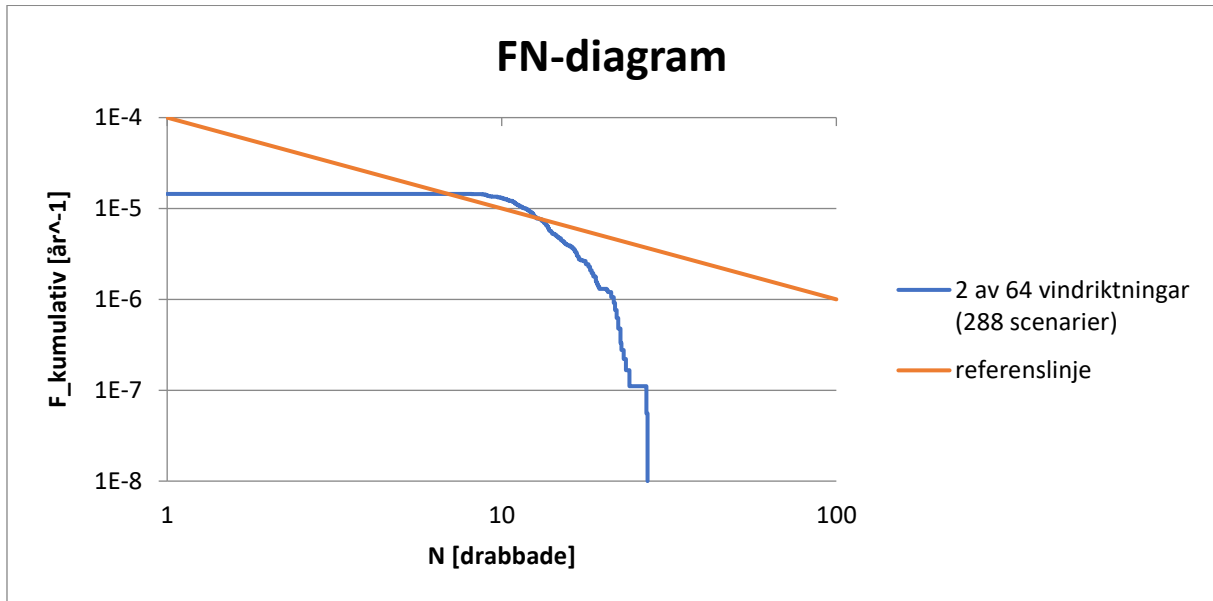
Figur 39 Maximalt riskbidrag i relativa tal mellan nivåerna för parametern temperatur. Varje punkt visar hur mycket maximalt riskbidrag procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



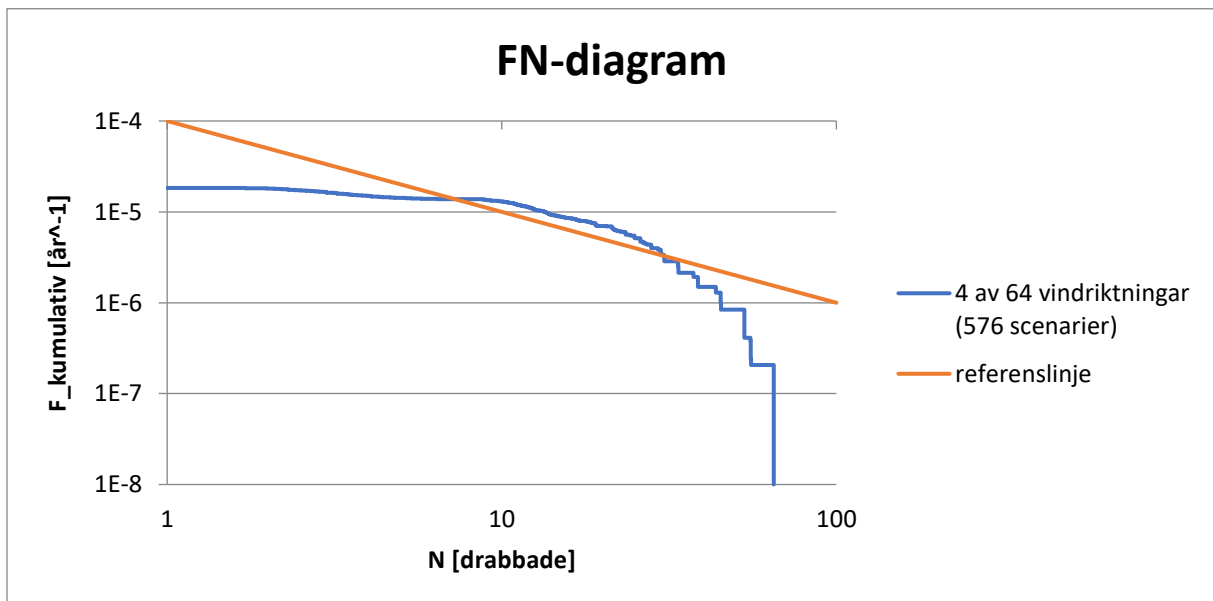
Figur 40 Medeldifferens av frekvens i relativa tal mellan nivåerna för parametern temperatur. Varje punkt visar hur mycket medeldifferens av frekvens procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

### 5.2.3 Vindriktning

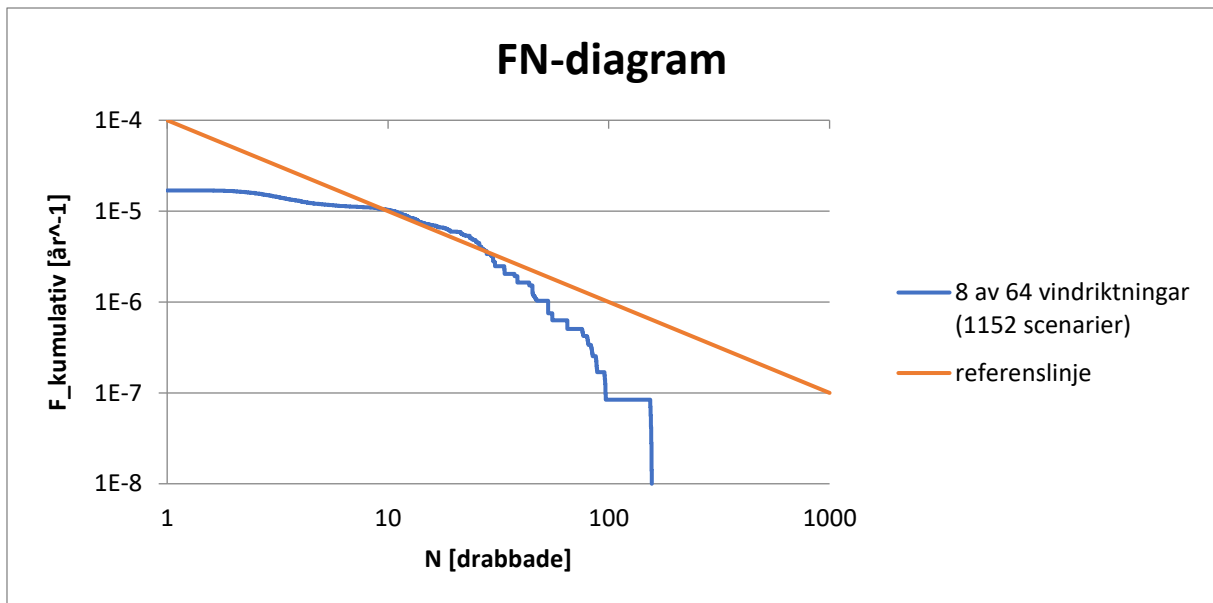
Först presenteras FN-kurvorna, se Figur 41-Figur 46. Sedan visas riskmått i relativa tal, se Figur 47-Figur 49.



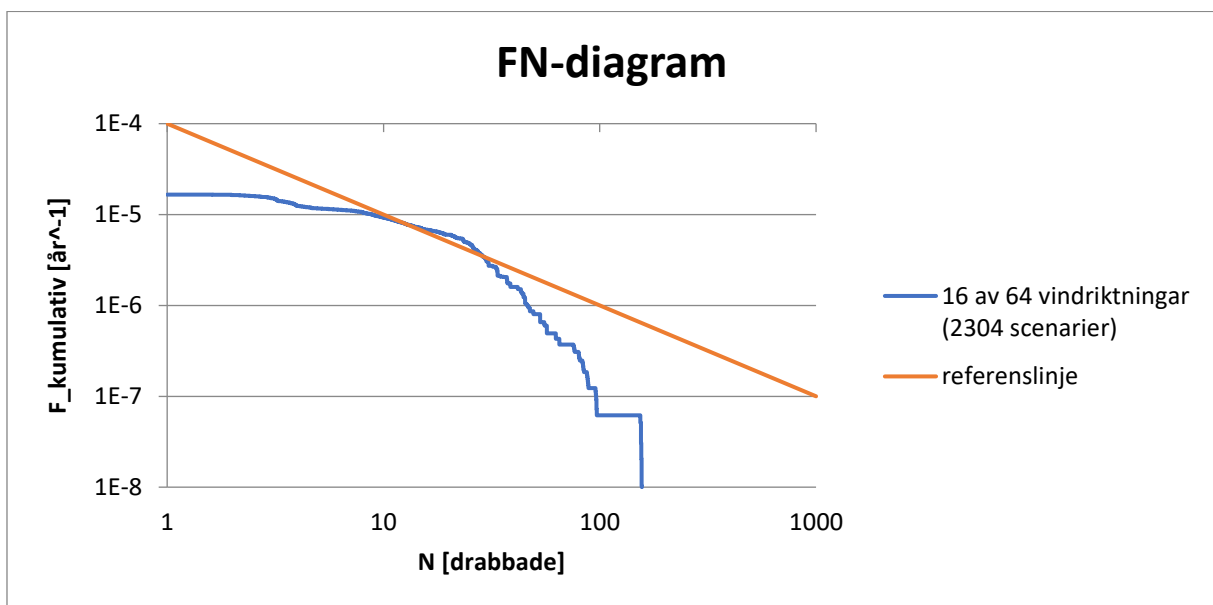
Figur 41 Parameterupptrappning 2 av 64 för parametern vindriktning.



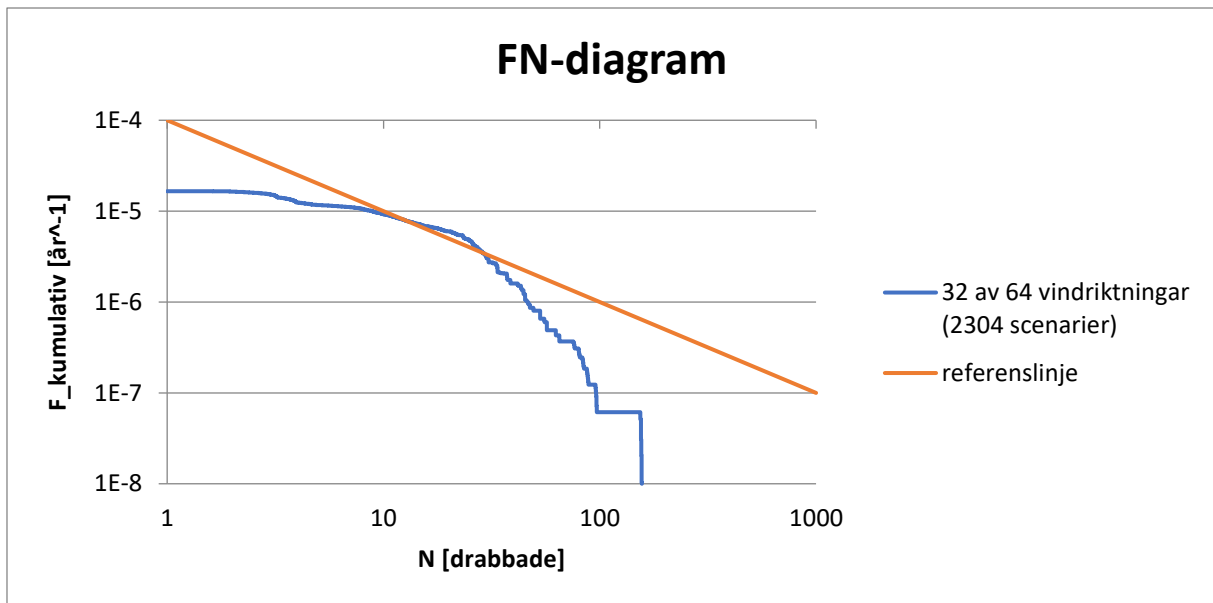
Figur 42 Parameterupptrappning 4 av 64 för parametern vindriktning.



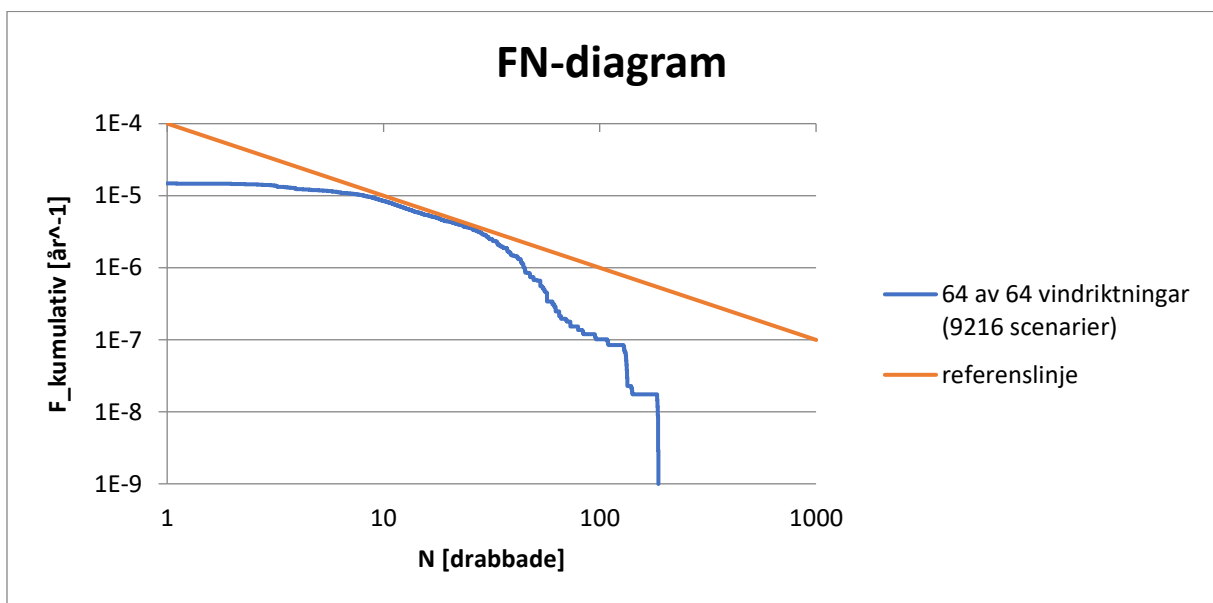
Figur 43 Parameterupptrappning 8 av 64 för parametern vindriktning.



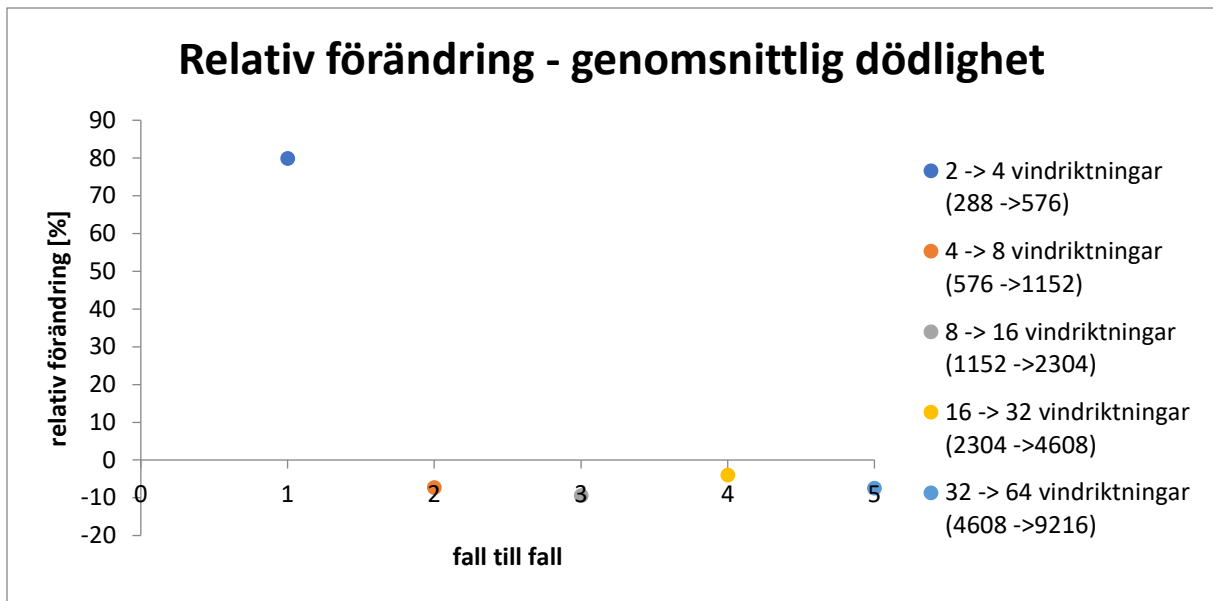
Figur 44 Parameterupptrappning 16 av 64 för parametern vindriktning.



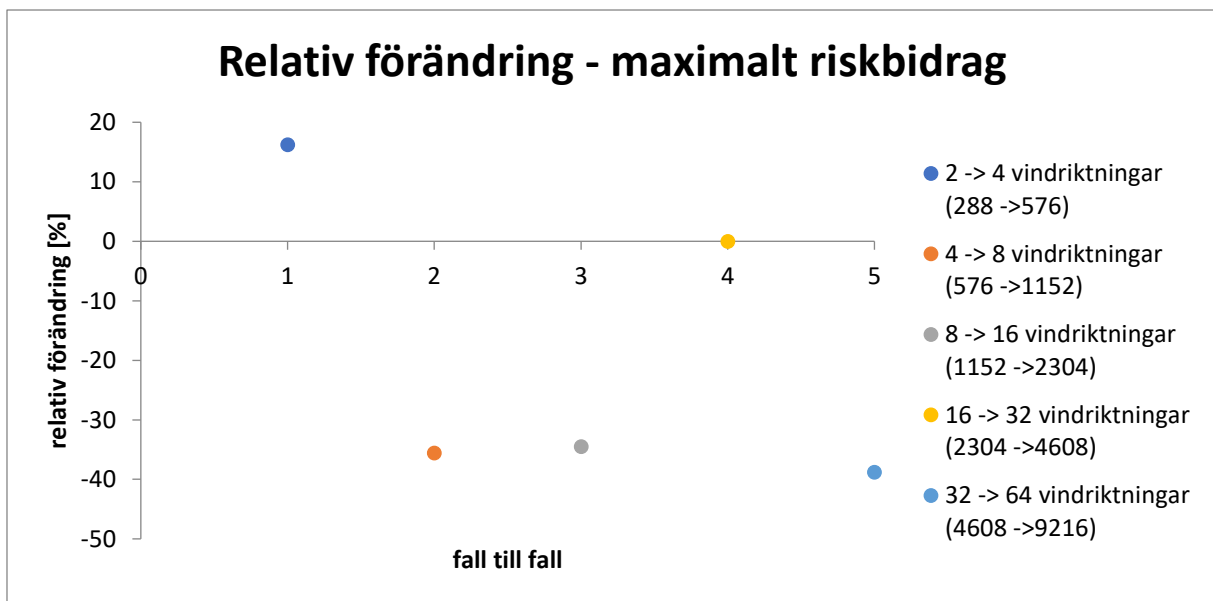
Figur 45 Parameterupptrappning 32 av 64 för parametern vindriktning.



Figur 46 Parameterupptrappning 64 av 64 för parametern vindriktning.

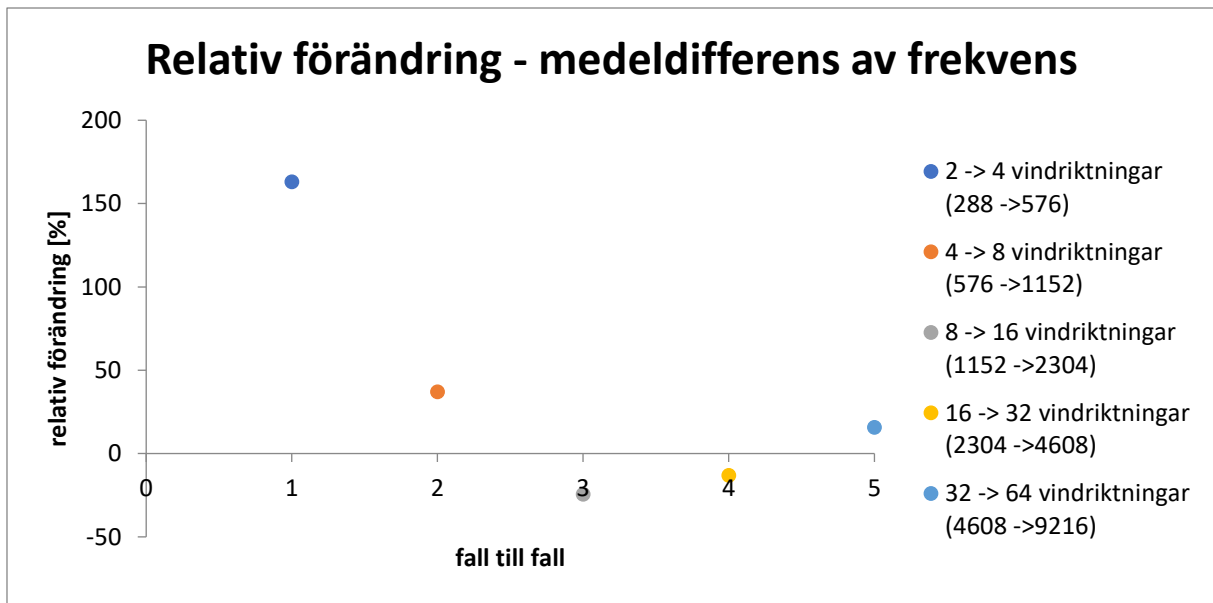


Figur 47 Genomsnittlig dödlighet i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindriktning. Varje punkt visar hur mycket genomsnittlig dödlighet procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



Figur 48 Maximalt riskbidrag i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindriktning. Varje punkt visar hur mycket maximalt riskbidrag procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

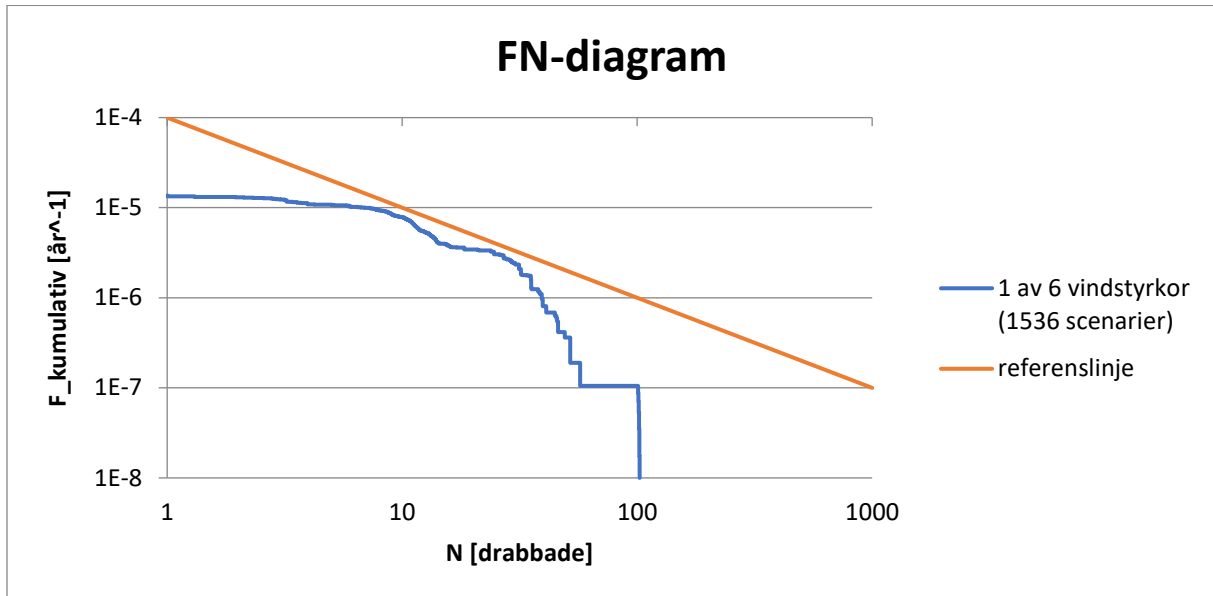




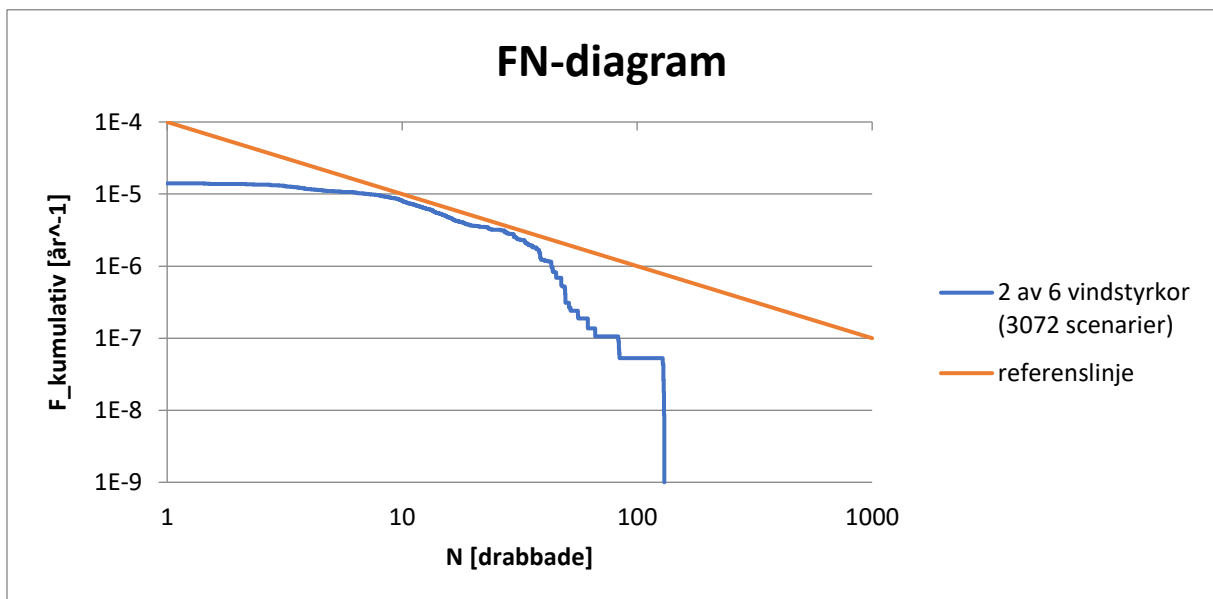
Figur 49 Medeldifferens av frekvens i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindriktning. Varje punkt visar hur mycket medeldifferens av frekvens procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

### 5.2.4 Vindstyrka

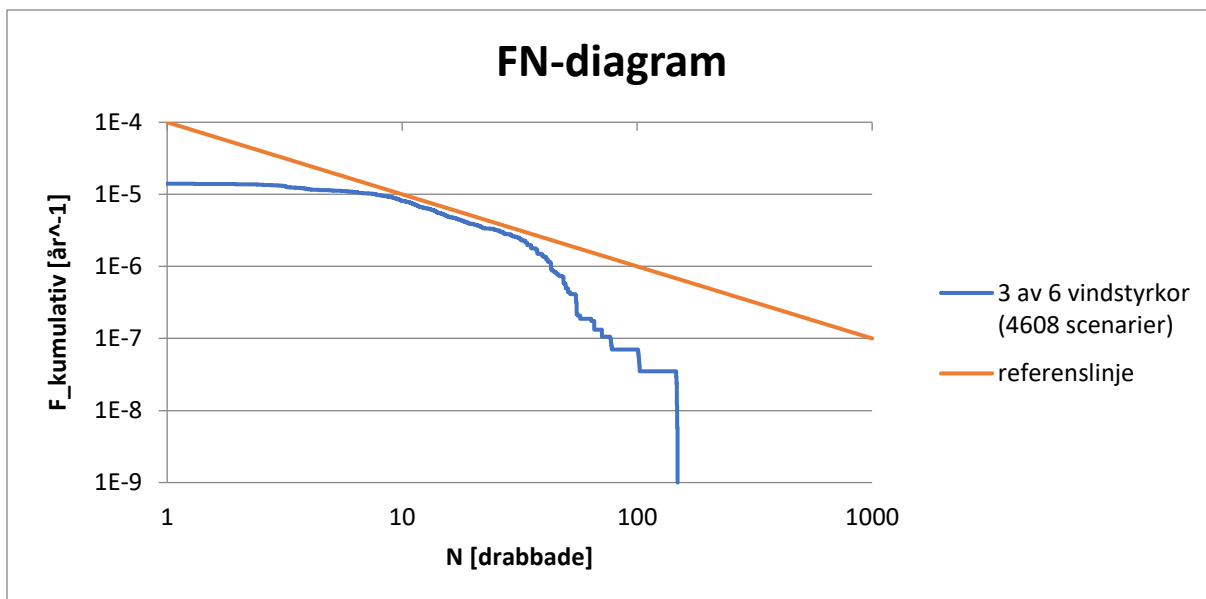
Först presenteras FN-kurvorna, se Figur 50-Figur 55. Sedan visas riskmått i relativa tal, se Figur 56-Figur 58.



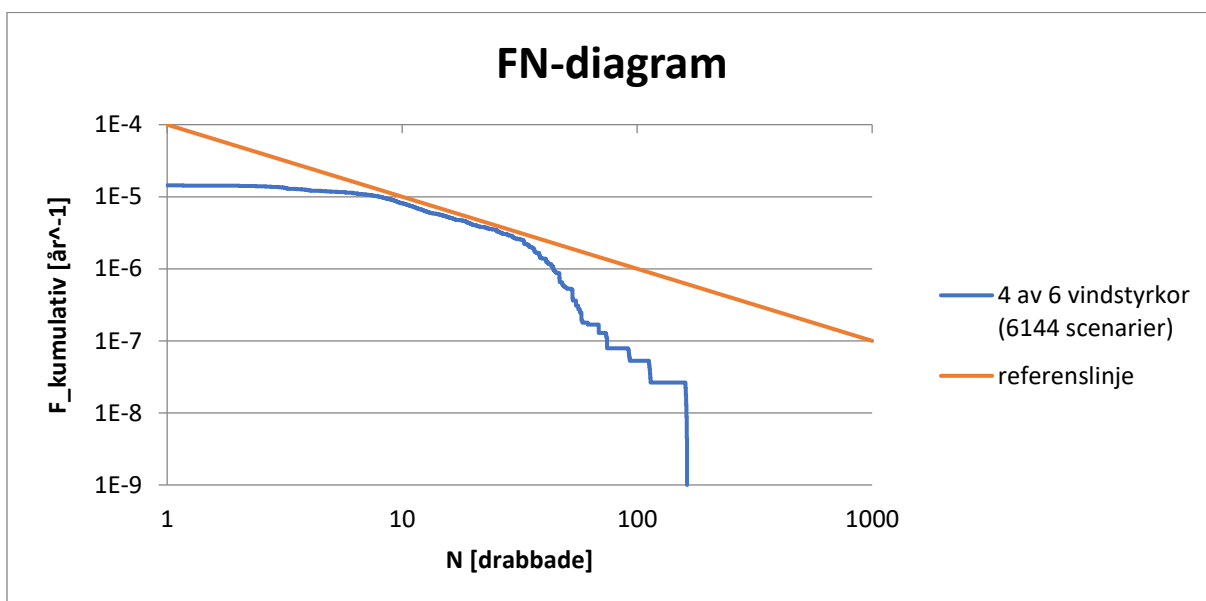
Figur 50 Parameterupptrappning 1 av 6 för parametern vindstyrka.



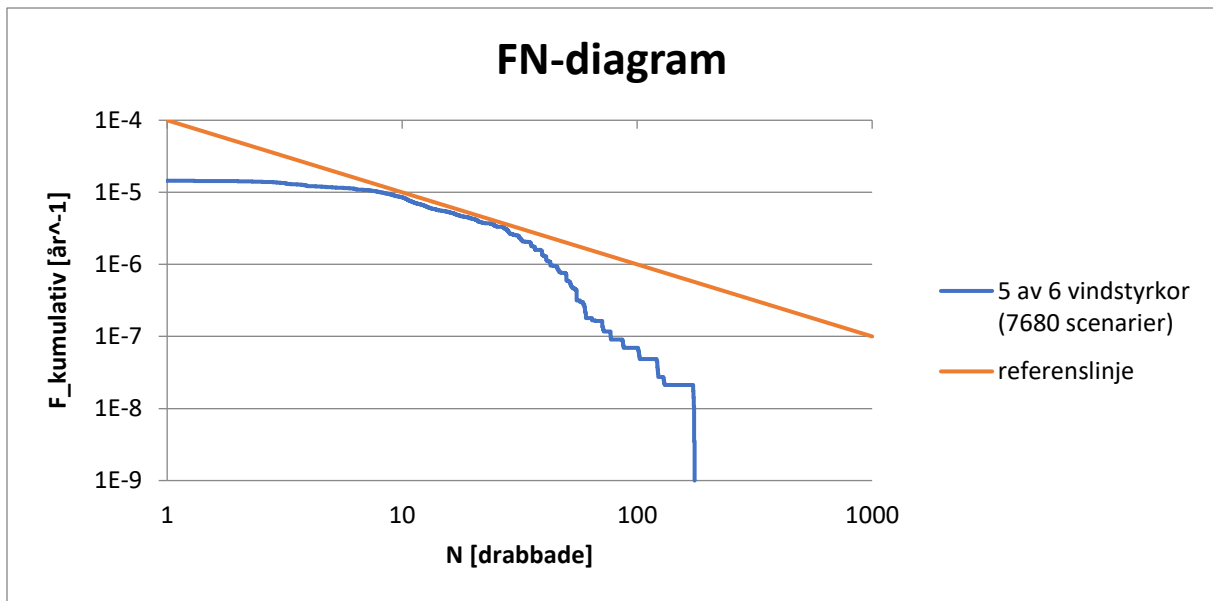
Figur 51 Parameterupptrappning 2 av 6 för parametern vindstyrka.



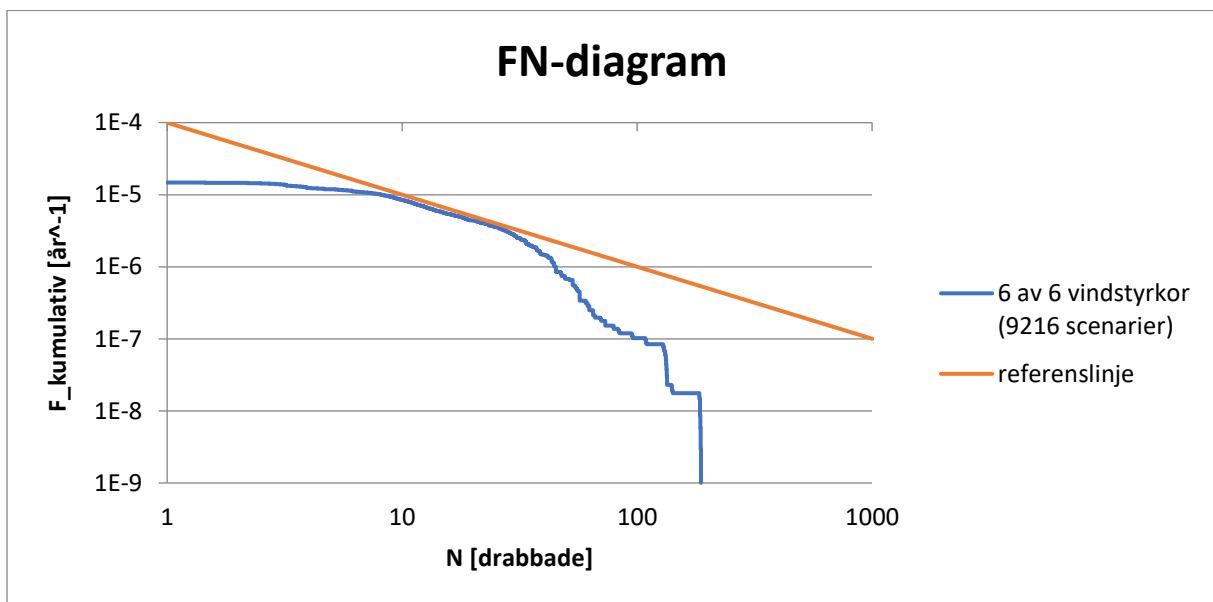
Figur 52 Parameterupptrappning 3 av 6 för parametern vindstyrka.



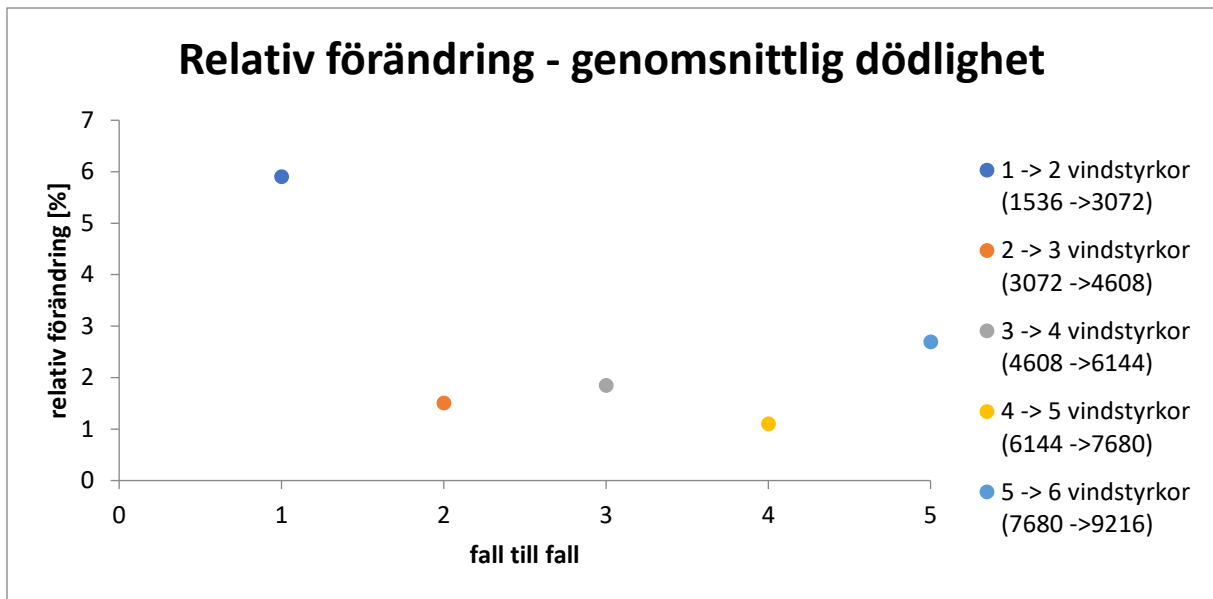
Figur 53 Parameterupptrappning 4 av 6 för parametern vindstyrka.



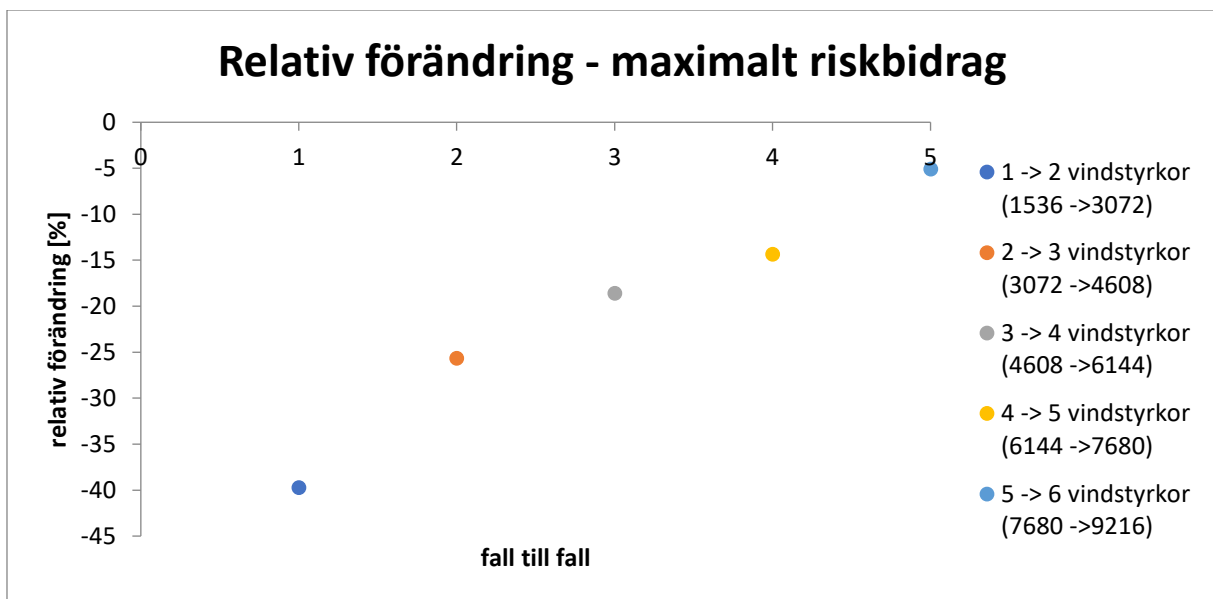
Figur 54 Parameterupptrappning 5 av 6 för parametern vindstyrka.



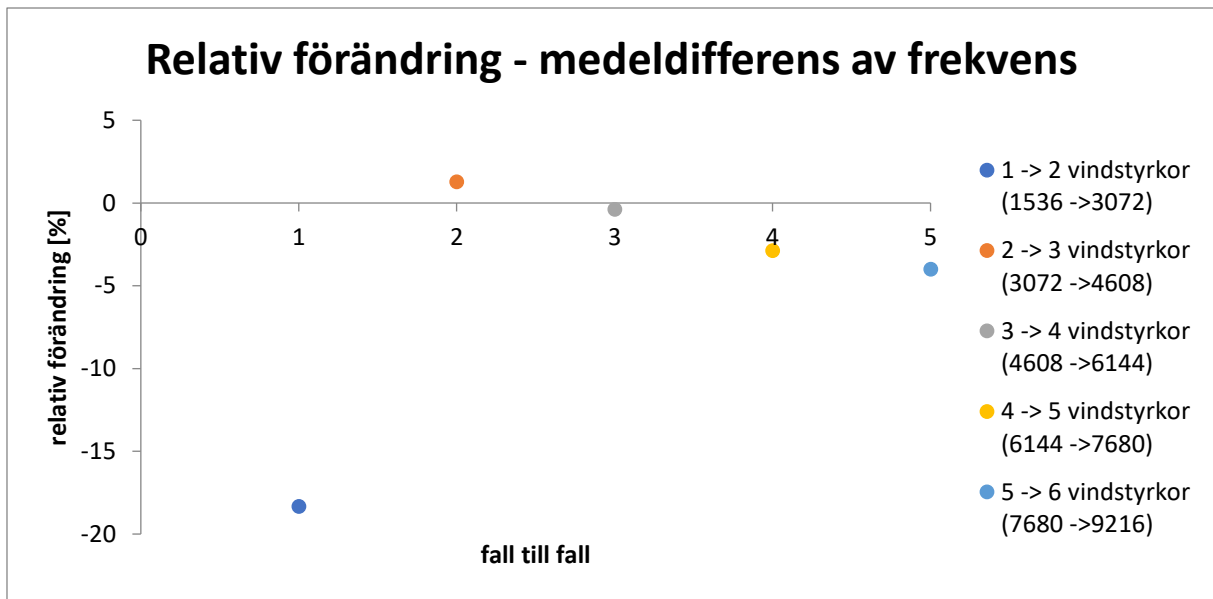
Figur 55 Parameterupptrappning 6 av 6 för parametern vindstyrka.



Figur 56 Genomsnittlig dödlighet i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindstyrka. Varje punkt visar hur mycket genomsnittlig dödlighet procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



Figur 57 Maximalt riskbidrag i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindstyrka. Varje punkt visar hur mycket maximalt riskbidrag procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.



Figur 58 Medeldifferens av frekvens i relativa tal mellan nivåerna för parametern vindstyrka. Varje punkt visar hur mycket medeldifferens av frekvens procentuellt ändras från en viss parameteruppdelning till en finare som förklaras i högra delen av figuren. X-axeln visar endast ordningen på de utförda simuleringarna.

## 6. Diskussion

I följande avsnitt diskuteras resultatet i linje med frågeställningar kopplat till syftet. Därefter görs reflektioner kring modellen och hur den kan påverka resultatet. Slutligen görs en allmän diskussion kring rapporten.

### 6.1 Analys av resultatets träffsäkerhet

Träffsäkerheten bedöms angående hur resultatet konvergerar mot något värde. Genom att successivt öka antalet scenarier går det att se på FN-kurvornas utformning, Figur 14-Figur 19, att de kryper längre ner mot referenslinjen och att kurvorna jämnas ut i takt med fler scenarier. Visuellt konstateras också i diagrammen att skillnaden blir mindre mellan de högre nivåerna där fler scenarier simulerats. Således verkar det som att kurvan konvergerar mot en viss utformning fastän det är svårt att fastställa. Avseende genomsnittligt drabbade, se Figur 20 och Figur 21, är det problematiskt att urskilja om något värde konvergeras. Dock visar det sig att den relativa skillnaden hålls låg efter nivå 2 med 16 scenarier. Det maximala riskbidraget, se Figur 22, ser ut att alltmer konvergera mot ett lägre värde vid ökning av antalet scenarier då kurvans derivata minskas successivt. Däremot ser medeldifferensen av frekvensen relativt referenskurvan ut att fluktuera en del, se Figur 24 och Figur 25, vilket motsätter sig den visuella bedömningen av FN-kurvorna.

### 6.2 Analys av vilka parametrar som påverkar resultatet mest

Först trappades parametern tidsperiod upp i antalet värden i sannolikhetsfördelningarna medan resten av parametrarna hölls konstanta. Populationstätheterna sammanknöts till tidsperioderna. Av diagrammen att döma verkar det som att denna parameter påverkar resultatet betydande, framför allt maximalt riskbidrag där resultatet kan påverkas upp till 50%, enligt Figur 30. Dessutom påverkas medeldifferensen av frekvensen med upp till 14 % från 2 till 4 tidsperioder, se Figur 31.

För temperaturparametern påverkades resultatet inte nämnvärt vid närmare observation av genomsnittlig dödlighet och medeldifferens av frekvens, enligt Figur 38 och Figur 40. När det kommer till maximalt riskbidrag i Figur 39 upptäcks en relativt slående minskning i värdena mellan upptrappningarna med ett ungefärligt intervall mellan 20%-50%. Dock är det inte något som märks tydligt i FN-kurvorna i Figur 32-Figur 37.

Vindriktningen tycks ha störst påverkan på resultatet. Det utkristalliserar sig redan i FN-kurvorna, Figur 41-Figur 46, som ändras märkbart jämfört med de andra parametrarnas FN-kurvor. Från 2 till 4 vindriktningar skiljs riskmättet genomsnittlig dödlighet med 80%. Vid fortsatt ökning verkar dock skillnaden vara låg mellan upptrappningarna, upp till 10%, se Figur 47. Det maximala riskbidraget i Figur 48 oscillerar i storleksordningen mellan -40% till 20%. Den kraftigaste skillnaden uppvisas gällande medeldifferens av frekvens där en ändring från 2 till 4 vindriktningar kan påverka resultatet med över 150% och ändring från 4 till 8 vindriktningar upp till 50%, vilket syns i Figur 49. Efter 8 vindriktningar stabiliseras differensen något.

Vindstyrkan tycks inte påverka FN-kurvornas utseende i någon vidare omfattning, Figur 50-Figur 55. Å andra sidan ser det ut som att det maximala riskbidragets ändring kan stabiliseras i jämn takt när antalet vindstyrkor ökas, där bedömning görs från Figur 57. Mellan de lägre upptrappningarna kan resultatet skiljas med ungefär 40%, 25% och 20%. I Figur 58 ser man att medeldifferensen av frekvensen är som störst jämförelsevis i övergången från 1 till 2 vindriktningar där resultatet avviker med 20%. Därutöver differerar resultatet inte anmärkningsvärt.

### 6.3 Analys av skede varvid resultatet påverkas mindre

Det stadium då resultatet inte påverkas i lika stor utsträckning är problematiskt att fastställa i antal scenarier då en riskanalys kan byggas upp på många olika sätt, vilket förändrar förhållandet mellan scenarioantalen. Utgångspunkten för diskussionen blir utifrån rapporten. I första undersökningsmetodikerna, successivt utökad antal scenarier, ändras resultatet en del trots att upplösningen ständigt förbättras. Ändå kan det uttydas att resultatets differens minskas och stabiliseras. I analysen av genomsnittlig dödlighet, Figur 20 och Figur 21, påverkas riskmålet mindre från och med nivå 2, det vill säga efter 16 scenarier. För maximalt riskbidrag sker en utplaning av differensen ungefär vid nivå 3 i Figur 22, vilket motsvarar 144 scenarier. Någon klar stabilisering kan inte uttydas av medeldifferensen på frekvensen i Figur 24.

I den andra undersökningsmetodikerna, parameterkänslighet, är antalet scenarier redan uppsatt högt då omgivande parametrar befinner sig på rapportens högsta nivå. Med denna metodik är det därför svårt att fastställa ett scenarioantal varvid mindre påverkan äger rum. Emellertid går det i stället att genomföra observationen med antalet parameteruppdelningar. Gällande riskmål som berör tidperioden hittas inget skede där utfallens differens minimeras. För genomsnittlig dödlighet kopplat till vindriktning börjar en stabilisering ske efter 4 vindriktningar, se Figur 47. För samma parameter berörande medeldifferens av frekvens skulle en mindre gradient kunna förefalla efter 8 vindriktningar, enligt Figur 49. I Figur 58 vid studerande av medeldifferens av frekvens sett till vindstyrkan verkar det som att åtminstone 2 vindriktningar vara nödvändiga för att det riskmålet ska vidhållas på en jämn nivå. Å andra sidan krävs det många vindriktningar för att tillfredsställa mindre förändring av maximalt riskbidrag i Figur 57, möjligtvis 6 olika vindstyrkor.

### 6.4 Modell för konsekvensberäkningar

I konsekvensberäkningarna valdes det att använda en källmodell och en modell för initial utspädning. För modell för initial utspädning användes en fri cirkulär jet i medvind. Då inga efterföljande modeller används för passiv spridnings skulle detta kunna leda till att risken underskattas. Koncentrationen som beräknades fram gäller för centrum längst bort i gasmolnet. Sedan antogs att samma koncentrationer även uppstår vid i ytterkanterna. Antagandet skulle kunna överskatta risken vid dessa områden. Det är vidare transparent med att modellens giltighetsavstånd utmanades i simuleringarna där avståndet överskreds flertalet gånger. Nämnvärt är att det inte alltid överskreds med stora avstånd med följden att resultatet ändå kan anses vara rimligt då största delen verkar inom gränsen. Samtidigt, som det förklarades i teorin, leder modellen till för höga koncentrationer på längre avstånd och är i den bemärkelsen konservativ för användning. Å andra sidan märktes det i testsimuleringarna att en jetmodell som tillämpas på tilltagna avstånd resulterar i långsmala utsläpp vars form kan ifrågasättas. Fördelaktigt skulle man kunna addera en ytterligare spridningsmodell som gäller för längre avstånd. Inom projektets tidsram ratades den idén. Det som talar för den befintliga modellen är att koncentrationer som observerades förorsakar dödsfall som uppstår vid högre ammoniakkoncentrationer på kortare avstånd. Dessutom har populationsområdena anpassats på kartan närmre anläggningen. I rapporten gjordes ingen kvantitativ analys huruvida modellen påverkar resultatet, vilket den rimligtvis skulle kunna göra. Det får sparas till en annan undersökning. Det är viktigt att komma ihåg att en modell är en förenkling av verkligheten, som togs upp i litteraturstudien. Dessutom kan de största osäkerheterna utgöras från modellen, antaganden, riskidentifieringen och definitionen. Följaktligen kan rapportens resultat vara mindre värdefullt om det visar sig att utgångsantagandena och modellen sämre speglar verkligheten. Därför förutsätter nästan studien att modellen från början är korrekt och att det fri väg för att studera träffsäkerhet och känslighet. Det går däremot inte att utesluta att tillämpande av andra modeller skulle kunna leda till andra svar i denna rapport gällande det som undersöktes.



## 6.5 Allmänna reflektioner

Ett träffsäkert resultat kanske inte nödvändigtvis behöver innebära att riskmått konvergerar mot specifika värden som det förmodades i rapporten. I undersökningen med successivt utökad antal scenarier kan en tendens anas om konvergens om än liten. I själva verket skulle resultatet för fler scenarier vara mer träffsäkert då det mer noggrant försöker spegla verkligheten. Men frågan är hur man alternativt skulle kunna mäta detta? Ett träffsäkert resultat är möjligtvis en definitionsfråga. Möjligtvis kanske det är rimligare att bedöma kvalitativt att resultatet bättre avspeglar verkligheten om man anstränger sig med noggranna och sanningsenliga indata i linje med litteraturstudien. Å andra sidan kan träffsäkerhet vara mer förenligt med att resultatet börjar fluktuera mindre vid fler scenarier och snarare vara kopplad till en av de andra frågeställningarna som undersöktes. I analysen för parameterkänslighet visades att tidsperioden är en betydande parameter för resultatet. I rapporten beror det delvis på att befolkningstätheterna är starkt sammanbundna till parametern med konsekvensen att en ändrad nivå av tidsperiod leder till andra befolkningstätheter. I första undersökningen med successivt fler scenarier ändrades nivån för tidsperiod ganska frekvent, vilket lägger om populationerna i landskapet väsentligt. Detta skulle kunna vara en anledning till att konvergens inte påträffades uppenbart. Inom bredare tidsram och för framtida studier skulle denna parameter kunna hållas konstant i en undersökningsmetod. Det bör dock tilläggas att det rimligtvis borde vara mer träffsäkert att ha fin fördelning på tidsperioderna då populationstätheterna sannolikt ändras beroende på vilken tid det är på dygnet.

I analysen granskades riskmåten: genomsnittlig dödlighet, maximalt riskbidrag och medeldifferens av frekvens relativt en referenslinje. Samtliga riskmått har på ett eller annat sätt att göra med konceptet FN-kurva. Det kan ifrågasättas om dessa mått är lämpade för att studera träffsäkerhet och känslighet då det finns fler till förfogande. Till exempel skulle man kunna tillämpa individrisk runtom anläggningen. Det problematiska i sammanhanget är att populationsbygden runtom inte är homogen, vilket kräver beräkning av individrisk i olika riktningar. Av den anledningen uteslöts det riskmålet då det blir svårt att jämföra med olika individrisker för olika riktningar. Men det skulle kanske vara möjligt att beräkna det för någon enstaka riktning och därmed följa förändringen. En annan invändning är vilket riskmått som har störst inverkan för studerandet av träffsäkerhet och känslighet. För det individuella riskmålet kanske det blir mer friktionsfritt, men för helheten är det inte helt självklart. Om man ser det till acceptanskriterier kanske maximalt riskbidrag är av stort intresse då man helst inte vill överskrida en bestämd linje. Möjligtvis kan medeldifferensen av frekvensen relativt acceptanskriteriet vara befogat i samma kontext för att se översiktligt hur FN-kurvan förhåller sig.

I den kvantitativa riskanalysen behandlades endast ett skadefall med utsläpp av ammoniak i gasform. Utifrån skadefallet mynnades det ut olycks scenarier med både olycksfrekvenser och händelsekonsekvenser. Det skulle kunna vara genomförbart att ha med samtliga skadefall från Skärhamnsanalysen. Den primära orsaken till att endast ett skadefall tillämpades är att fokus snarare var att studera efterkommande antal scenarier och träffsäkerhet. Skadefallet behövdes mestadels för exemplens och för startobjektets skull. Dessutom kan fler skadehändelser öka totala antalet scenarier med en rejäl faktor som i sin tur påverkar simuleringstiden. För den högsta nivån i rapporten simulerades nästan 10 000 scenarier. En multiplikation med en faktor på detta antal skulle öka simuleringstiden påtagligt. Samtidigt verkar det som att det finns en begränsning i hur många element en matris kan innehålla i VBA, vilket också påverkar maximala antalet simuleringar som utfördes.

I resultatdelen presenterade åtskilliga FN-kurvor för jämförelse där logaritmisk skala gäller för både kumulativ frekvens och antal omkomna. Flertalet av kurvorna ser närmast identiska ut och kan emellertid tolkas som intetsägandet vid jämförelse av simuleringar vid de högre nivåerna. Det visar sig om man förstorar diagrammen och ändrar tillbaka till vanlig skala att det lättare går att se skillnad. Anledningen till att logaritmisk skala användes är för att det ansågs som praxis och för att referenskurvans skepnad byggs på den logiken.

Dataunderlaget som eftersöktes för att genomföra analysen anses vara god. Framför allt beträffande temperatur, vindriktning och vindstyrka som redovisades dagligen vid bestämda tidslag. Populationsdata erhöles från Skärhamnsanalysen och begränsade underlaget mest. Därtill möjliggjordes inte en fortsatt finfördelning av parametern för tillhörande tidsperiod upp till nivå 6 och kan i viss mån ha påverkat analysen genom att de andra parametrarna finfördelats mer.

Temperaturen är en av parametrarna som analyserades. Temperaturen är ingen variabel i någon av ekvationerna, men antas påverka luftdensiteten enligt sambandet ideala gaslagen med konstant tryck. Resultatet för denna parameter bör användas med försiktighet då det inte hittades evidens för tillvägagångsättet.

Vinddata som inhämtades från SMHI innefattar steg om 10 grader. Den finaste upplösta nivån innehölls av 64 vindriktningar med vardera omfånget 5,6 grader. I och med att indelningen är smalare än dataunderlagets kan det ge upphov till att den högre upplösningen inte fångas upp. Poängterbart är att det endast inträffades för den översta nivån.

Avslutningsvis påpekas att den kvantitativa riskanalysen utfördes som en fallstudie. Det skulle kunna få som innebörd att resultatet kommer att skilja sig beroende på vilket område och objekt man undersöker. För att kontrollera resultatet i denna rapport är det fördelaktigt att göra liknande analyser på flera olika fall. Därför kommer det vara svårt att dra definitiva slutsatser från rapporten.

För framtida studier kan det vara relevant att ha en ytterligare undersökningsmetodik där man successivt ökar antalet scenarier utan att ändra populationstätheternas fördelningar för att avgöra om det kan leda till skillnad i resultatet. Detta för att observera om rapporten får samma resultat med fixa värden på populationstätheterna.

## 7. Slutsatser

Det analyserades om fler scenarier med utökade noggrannheter leder till ett träffsäkrare resultat. Vidare undersöktes vilka parametrar som påverkar resultaten mest och vid vilket skede resultatet inte påverkas nämnvärt i takt med utökad noggrannhet. Kvantitativt beräknades resultat med riskmått där noggrannheterna successivt förfinades och skillnaderna fastslogs mellan noggrannhetsnivåerna. Därmed uppfylldes målen för undersökningen. Analysen kopplat till frågeställningarna och målen leder fram till följande slutsatser:

- Rapporten visar att det är svårt att beräkningsmässigt bedöma om fler scenarier med utökade noggrannheter leder fram till ett träffsäkrare resultat avseende konvergens mot ett värde. Möjligtvis kan resultatets variation eller relativa förändring vara ett lämpligare mått för träffsäkerheten. I sådant fall kan rapporten i detta avseende ge indikationer på att fler scenarier och förfinade fördelningar leder till ett träffsäkrare resultat då resultatets variation reduceras under förutsättningen att känsliga parametrar behandlas tillräckligt.
- Det tycks som att parametrarna tidsperiod (med populationstätheter) och vindriktning påverkar resultatet i störst omfattning i aktuell fallstudie.
- Utifrån ett skadefall verkar det som att minst 16-144 scenarier, med fokus på indelningarna för tidsperiod och vindriktning, är rimligt för att inte resultatet ska påverkas alltför mycket.
- Under förutsättningen att alla omgivande parametrar hålls konstanta på en skaplig nivå finns det indikationer på i fallstudien att minst 4-8 vindriktningar är någorlunda tillräckligt för att resultatet inte ska ändras markant.

Det konstateras även att mer forskning med andra fallstudier och modeller behövs för att validera resultatet. Dessutom kan det i förlängningen vara värt att även testa en Monte Carlo-metod när antalet scenarier är stort med många tillämpade värden från sannolikhetsfördelningar. En Monte Carlo-metod med slumpmässigt tagna värden skulle här möjligtvis kunna konvergera bättre mot ett korrekt resultat. Däremot i rapporten när antalet simuleringar är färre och beräkningstunga kan metoden i rapporten vara lämpligare genom att värden från sannolikhetsfördelningar tas utifrån ett förutbestämt mönster.

## 8. Referenser

- Arendt, J. S., & Lorenzo, D. K. (2000). *Evaluating Process Safety in the Chemical Industry*. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- Davidsson, G., Lindgren, M., & Liane, M. (1997). *Värdering av risk*. Karlstad: Statens räddningsverk.
- Elsevier. (2022, mars 15). Retrieved from ScienceDirect:  
<https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect>
- Eniro. (2022, maj 9). *kartor*. Retrieved from Skärhamn:  
<https://kartor.eniro.se/?c=57.984546,11.552682&z=15&l=aerial&q=%22sk%C3%A4rhamn%22;geo>
- Fischer, S., Forsén, R., Hertzberg, O., Jacobsson, A., Koch, B., Runn, P., . . . Winter, S. (1998). *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor*. Tumba/Umeå: FÖRSVARETS FORSKNINGSANSTALT.
- Goerlandt, F., Khakzad, N., & Reniers, G. (2017). Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis. *Safety Science*, 127-139.
- Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. (2000). New York: Center for Chemical Process Safety.
- Haefliger, L., Hannah, J., Davidsson, G., & Akersten, P. A. (2000). *Vägledning för riskbedömning av kyl- och frysanläggningar med ammoniak*. Göteborg: Karlstad.
- Höst, M., Regnell, B., & Runeson, P. (2006). *Att genomföra examensarbete*. Lund: Holmbergs.
- Kaplan, S., & Garrick, J. (1981). *On The Quantitative Definition of Risk*. Wiley.
- Lunds Universitet. (2022, Mars 14). Retrieved from LUBsearch & elektroniska resurser: Vad är LUBsearch?: <https://libguides.lub.lu.se/lubsearchchochelektroniskaresurser/lubsearch>
- Microsoft. (2021, September 13). Retrieved from Office VBA Reference:  
<https://docs.microsoft.com/en-us/office/vba/api/overview/>
- Pasman, H., Jung, S., Prem, K., Rogers, W., & Yang, X. (2009). Is risk analysis a useful tool for improving process safety? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 769-777.
- SMHI. (2022, mars 24). Retrieved from Ladda ner meteorologiska observationer:  
<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airtemperatureInstant,stations=all,stationid=81060>
- Wexler, P. (2014). *Encyclopedia of Toxicology*. Bethesda: Elsevier.
- Wiley. (2022, mars 12). Retrieved from Wiley Online Library: <https://onlinelibrary.wiley.com/>

## Bilaga

Följande bilaga redovisar konstanter i programmet och vilka värden de har.

$P_0$	14	Tryck inuti behållare [ <i>bar</i> ]
$\gamma$	1,32	Poissons kvot [–]
$P_a$	1,01325	Atmosfärstryck [ <i>bar</i> ]
$C_d$	0.8	Kontraktionsfaktor [–]
$A$	0,00785	Hålets tvärsnittsarea [ $m^2$ ]
$R$	489,1	Gaskonstant [ $J/kg \cdot K$ ]
$T_0$	338	Temperatur inuti behållare [ $K$ ]
$R_*$	8314	Universell gaskonstant [ $J/kmol \cdot K$ ]
$m$	17	Molvikt [ $kg/kmol$ ]