

Antaganden i riskutredningar vid fysisk planering med avseende på transport av farligt gods och deras effekt på riskbilden

Fredrik Strindberg & Jesper Svensson | Riskhantering och samhällssäkerhet | LTH | LUNDS UNIVERSITET



**Antaganden i riskutredningar vid fysisk planering med
avseende på transport av farligt gods och deras effekt på
riskbilden**

**Fredrik Strindberg
Jesper Svensson**

Lund 2018

Title: Assumptions in risk assessments in land use planning regarding transportation of dangerous goods and their effect on the risk level

Fredrik Strindberg
Jesper Svensson

Number of pages: 95
Illustrations: 34

Keywords

Risk assessment, Land-use planning, Transportation of dangerous goods, Assumptions, Societal risk, QRA, Consequence analysis.

Abstract

Risk assessments regarding transportation of dangerous goods are a vital part of land-use planning. This is regulated by laws and regulations to ensure that risk levels are acceptable. Thus, it is of interest to the general public that these risk assessments are as accurate as possible. However, the establishment of these risk assessments tend to be somewhat problematic. Information may be inadequate, calculation models used are a simplification of reality, and the input parameters are subject to uncertainties. Due to this, assumptions are made when assessing and calculating risk levels. In this master thesis, the effect of these assumptions are examined and quantified. The results showed that the risk levels varied with approximately two orders of magnitude due to the uncertainties associated with the input data. In relation to conventional risk acceptance criteria, this variation can cause a risk assessment to reach different conclusions as a result of the different assumptions that are made.

© Copyright: Division of Risk Management and Societal Safety, Faculty of Engineering
Lund University, Lund 2018
Avdelningen för Riskhantering och samhällssäkerhet, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2018.

Riskhantering och samhällssäkerhet
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

<http://www.risk.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Risk Management and Societal Safety
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

<http://www.risk.lth.se>

Telephone: +46 46 222 73 60

Sammanfattning

En stor del av stadsplanering involverar upprättande av översikts- och detaljplaner. Dessa planer utgörs av dokument som kommuner i Sverige upprättar för att förmedla den generella riktningen för hur mark- och vattenområden ska brukas. Detta förfarande kallas för fysisk planering.

Vid ny- och ombyggnation i närhet av transportled med farligt gods skall en riskutredning genomföras. En riskutredning i denna kontext syftar till att fastställa att den planerade förändringen ej medför oacceptabla risknivåer med avseende på människor liv och hälsa. Dessa risknivåer jämförs med vedertagna acceptanskriterier för vad som anses vara acceptabelt. Risknivåerna undersöks via riskutredningar som bland annat involverar att identifiera, analysera och beräkna konsekvenser som kan inträffa till följd av olyckor med farligt gods.

Det finns problematik kopplat till riskutredningar. Underlaget kan vara bristfälligt, beräkningsmodeller som används är en förenkling av verkligheten och indataparametrarna är behäftade med osäkerheter. Vid bristfälligt underlag måste flertalet antaganden göras. Dessa antaganden har i förlängningen en effekt på riskutredningens resultat. Vidare avgör riskutredningens resultat och slutsatser huruvida planerad bebyggelse får uppföras eller ej. Det är således av intresse att dessa riskutredningar håller hög kvalitet och på ett rättvisande sätt förmedlar risknivåerna som råder.

Alvarsson & Jansson (2016) har i ett tidigare examensarbete genomfört en jämförelsestudie av riskutredningar med avseende på transport av farligt gods. Målet med denna jämförelsestudie var att kartlägga skillnader och likheter i tillvägagångssätt mellan olika konsultbolag. Detta gjordes bland annat genom att sammanställa data för de indataparametrar som används i riskutredningarna för att beräkna risknivåer. Med den information som erhöles från de undersökta riskutredningarna kunde en kvalitativ analys genomföras i jämförelsestudien. Alvarsson & Jansson (2016) konstaterade att det råder stora osäkerheter för de indataparametrar som används i riskutredningar.

Målet med detta examensarbete är att med utgångspunkt i jämförelsestudien av Alvarsson och Jansson (2016) kvantitativt undersöka effekten som antaganden vid beräkningsförfarandet har på riskutredningars resultat. Denna process inleddes genom att tillskriva sannolikhetsfördelningar till det dataunderlag som finns i jämförelsestudien. Därefter genomfördes konsekvensberäkningar med sannolikhetsfördelningar som indata. På detta sätt kunde individ- och samhällsrisik beräknas med 90 % konfidensintervall. Dessa intervall förmedlar osäkerheten som antaganden i beräkningsprocessen orsakat. Därmed kunde antagandenas effekt på riskbilden kartläggas.

Resultaten i detta examensarbete visar att individ- och samhällsrisk varierar med ca två tiopotenser inom ett 90 % konfidensintervall till följd av den variation som antagandena medför. Antaganden hos samtliga indataparametrar kunde emellertid inte beaktas. Den beräknade variationen i detta examensarbete är således rimligen en underskattning. I praktiken skulle en variation på två tiopotenser i individ- och samhällsrisk kunna innebära omfattande skillnader i en riskutrednings slutsats. Används vedertagna acceptanskriterier skulle detta konkret kunna innebära skillnaden mellan att en planerad förändring ger upphov till tolerabla risknivåer med vissa antaganden medan andra antaganden ger upphov till oacceptabla risknivåer.

De känslighetsanalyser som genomförts visar att indataparametern frekvens för olycka med farligt gods har störst inverkan på samhällsrisk i form av förväntat antal döda per år. Därefter följer indataparametrarna sannolikhet för pölbrand givet olycka och andel av farligt gods som utgörs av giftiga gaser.

Resultaten i detta examensarbete medför inte att acceptanskriterierna bör ändras. Däremot kan det vara användbart att undersöka var 95-percentilen befinner sig i förhållande till ALARP-området när osäkerheter beaktas då det kan ge en indikation om huruvida mer information om indataparametrarna bör inhämtas eller om risknivån är acceptabel även då osäkerheter beaktas.

En rekommendation är att en ny jämförelsestudie genomförs där ett större antal riskutredningar kartläggs. En annan rekommendation är att hantera osäkerheterna genom att tydligt förmedla dessa i riskutredningar. Ytterligare ett sätt att hantera osäkerheter är att implementera liknande metodik som i detta examensarbete där indataparametrar ingår som fördelningar för att sedan även kunna presentera ett konfidensintervall vid presentation av olika riskmått.

Summary

A large part of urban planning involves the formation of comprehensive plans and detailed development plans. These plans consist of documents drawn up by municipalities in Sweden to convey the general direction of how land and water areas are to be used. This process is called land-use planning.

In case of planned infill or rebuilding near transport routes of dangerous goods, a risk assessment must be carried out. A risk assessment in this context aims at establishing that the planned change does not entail unacceptable risk levels with regard to the lives and health of people in the vicinity. These risk levels are compared with conventionally recognized acceptance criteria for what is considered acceptable. Risk levels are examined by use of risk assessments that involve identifying, analyzing and calculating consequences that may occur because of accidents involving dangerous goods.

There are problems associated with risk assessments. Information may be inadequate, calculation models used are a simplification of reality, and the input parameters are subject to uncertainties. In case of insufficient information, a number of assumptions must be made. These assumptions have an effect on the results of the risk assessment. Additionally, the results and conclusions of the risk assessment determine whether or not the planned construction can be built or not. It is therefore of interest that these risk assessments maintain high quality and convey the risk levels in an accurate manner.

Alvarsson & Jansson (2016) have conducted a comparative study of risk assessments with regard to the transport of dangerous goods in a previous master thesis. The aim of this comparative study was to identify differences and similarities in approaches between different consulting companies. This was done, inter alia, by compiling data for the input parameters used in risk assessments. With the information obtained from these risk assessments, a qualitative analysis could be conducted in the comparative study. Alvarsson & Jansson (2016) found that there are major uncertainties regarding the input parameters used in risk assessments.

The aim of this master thesis is to examine the effect that assumptions in the calculation process have on the results of risk assessments in a quantitative manner based on the comparative study of Alvarsson and Jansson (2016). This process was initiated by attributing probability distributions to the database contained in the comparative study. Subsequently, consequence analyses were carried out with probability distributions as input data. Thus, individual and societal risk could be calculated with 90% confidence intervals. These ranges convey the uncertainty of assumptions in the risk assessment. Thus, the impact of assumptions on the risk level could be mapped.

The results in this master thesis show that individual and societal risk varies by about two orders of magnitude within a 90% confidence interval because of the variation caused by the assumptions. However, assumptions of all input parameters could not be taken into account. It is therefore likely that the estimated variation in this master thesis is underestimated. In practice, a variation of two orders of magnitude in individual and societal risk could infer major differences in the conclusion of a risk assessment. The use of conventionally recognized acceptance criteria could in concrete terms lead to the difference between a planned change giving rise to tolerable levels of risk with certain assumptions, while other assumptions give rise to unacceptable risk levels.

The sensitivity analyses carried out show that the input parameter *accident rate with dangerous goods* has the greatest impact on the societal risk in terms of the expected number of deaths per year. The following input parameters are *likelihood of pool fire* and *percentage dangerous goods consisting of toxic gases*.

The results of this master thesis do not imply that conventionally recognized acceptance criteria should be adjusted. However, it may be useful to investigate where the 95 percentile is located in relation to the ALARP area when uncertainties are considered, as this may indicate whether more information about the input parameters should be gathered or if the risk level is acceptable even when uncertainties are considered.

One recommendation is that a new comparative study is conducted where a larger number of risk assessments are mapped. Another recommendation is to manage uncertainties by clearly communicating these in future risk assessments. Another way to manage uncertainties is to implement similar methodology as in this thesis work, where input parameters are included as distributions and then present a confidence interval when presenting different risk measures.

Förord

Vi vill tacka följande personer:

Handledaren

Henrik Hassel, Universitetslektor vid avdelningen för riskhantering och samhällssäkerhet och programledare för riskhanteringsprogrammet.

För bidragande information

Lena Zetterqvist, Universitetslektor i matematisk statistik vid Lunds tekniska högskola

Joakim Lübeck, Universitetsadjunkt i matematisk statistik vid Lunds tekniska högskola

Nomenklatur

$a_y, a_z,$ b_y, b_z	Stabilitetsberoende parametrar	[-]
A	Area, Tvärsnittsarea hos hål	[m ²]
A _e	Håldiameter	[m]
A _p	Area av pöl	[m ²]
B	Dimensionslöst masstransporttal	[-]
b'	Förbränningshastighet per ytenhet vid pölbrand	[kg m ⁻² s ⁻¹]
c _p	Specifikt värme vid konstant tryck	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
c _v	Specifikt värme vid konstant volym	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C _d	Kontraktionsfaktor	[-]
C _g	Volymandel	[m ³ m ⁻³ , ppm]
C _{p,luft}	Värmekapacitet för luft = 1	[J g ⁻¹ K ⁻¹]
d _f	Flamdiameter (pölbrand)	[m]
d _p	Pöldiameter	[m]
D	Diameter (Eldklotsdiameter / Pöldiameter)	[m]
h	Konvektivt värmeövergångstal	[W m ⁻² K ⁻¹]
h _c	Energivärde	[J kg ⁻¹]
h _f	Flamhöjd (pölbrand)	[m]
F	Dragkraft / Rörelsemängdsflöde	[N]
F ₁₂	Vinkelkoefficienten för yta A ₁ mot yta A ₂	[kg s ⁻¹]
f _i	Frekvens för slutkonsekvens	[år ⁻¹]
g	Tyngdacceleration = 9,81	[m s ⁻²]
H _{eff}	Utsläppskällans höjd över mark	[m]
IR	Individrisk. Risk för enskild individ	[år ⁻¹]
IR _{x,y}	Total individrisk på den geografiska platsen (x, y). Sannolikhet att omkomma per år	[år ⁻¹]
IR _{x,y,i}	Individrisk på den geografiska platsen (x, y). Sannolikhet att omkomma per år till följd av slutkonsekvens i	[år ⁻¹]
k _{luft}	Konduktivitet för luft (= 0,02568)	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
K _r	Korrektionsfaktor för skrovlighet av underlag vid tunggasspridning	[-]
K _{rp}	Korrigerig för underlagets skrovlighet	[-]
K _s	Korrektionsfaktor för atmosfärens stabilitet vid tunggasspridning	[-]
K _{yt}	Samplingtidens (medelvärdesbildningstidens) påverkan på horisontell spridning	[-]
L _b	Längdskala för tunggasutsläpp	[m]
m	Massa hos en kilomol av undersökt ämne	[kg kmol ⁻¹]
ṁ _s	Massflöde	[g s ⁻¹]

\dot{m}''_s	Massflöde från yta	[g m ⁻² s ⁻¹]
M	Bränslemassa	[kg]
n	Antal slutkonsekvenser som beaktas i analysen	[-]
Nu	Nusselts tal	[-]
$P_{f,i}$	Sannolikhet att en slutkonsekvens i resulterar i dödsfall på den geografiska platsen (x, y)	[år ⁻¹]
P	Strålning	[W m ⁻²]
P_0	Tryck i behållare	[N m ⁻²]
P_1	Strålningen från yta A ₁	[W m ⁻²]
P_{12}	Infallande strålning från yta A ₁ till yta A ₂	[W m ⁻²]
P_a	Atmosfärstryck	[N m ⁻²]
P_e	Utloppstryck	[N m ⁻²]
Pr	Prandtls tal för luft (= 0,71)	[-]
Q	Massflöde från källa	[kg s ⁻¹]
r_v	Eldklotets radie	[m]
R	Gaskonstant	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
R_*	Universella gaskonstanten = 8 314	[J K ⁻¹ mol ⁻¹]
Re	Reynolds tal	[-]
T_0	Temperatur i behållare	[K]
T_e	Utloppstemperatur	[K]
u_e	Utloppshastighet	[m s ⁻¹]
u, u_w , U	Vindhastighet	[m s ⁻¹]
U	Advektionshastighet av plym	[m s ⁻¹]
(x, y, z)	Avstånd från utsläppskälla	[m]
x	Avstånd	[m]
x_2	Avstånd till nedre brännbarhetsgräns	[m]
x_{y0}, x_{z0}	Avstånd till virtuella källor	[m]
$Y_{F\infty}$	Massfraktion bränsle i luft ovanför bränsleytan	[-]
Y_2	Nedre brännbarhetsgräns	[kg kg ⁻¹]
Y_g	Massandel	[kg ⁻¹ kg ⁻¹ , ppm]
Y_{FR}	Massfraktion bränsle vid ytan i gasfas	[-]
Y_{FW}	Massfraktion bränsle i vätskepoLEN	[-]
α_c	Absorptionsfaktor (koldioxid)	[-]
α_w	Absorptionsfaktor (vattenånga)	[-]
γ	Poissons kvot (c_p/c_v)	[-]
Y_y	Stabilitetsberoende parameter	[-]
θ	Vinkel mellan normal till objektets yta och linje mellan objektet och strålkällans centrum	[°]

ρ	Spearmans rangkorrelationskoefficient	[-]
ρ_a	Densitet luft	[kg m ⁻³]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Dispersionskoefficienter	[m]
σ_{y0}, σ_{z0}	Initiala dimensionsmått i atmosfärspridningsmodell (standardavvikelse vid avstånd $x=0$)	[m]
σ'_{yp}	Tillväxthastighet av passiv plym med avstånd x , $d\sigma_y/dx$	[m m ⁻¹]
T_a	Transmissionsförmågan	[-]
$\chi(x, y, z)$	Koncentration som funktion av x, y, z	[kg m ⁻³]
X_m	Högsta koncentration i centrum av plym i marknivå	[kg m ⁻³]

Definitioner

Aleatorisk osäkerhet: Naturlig variation (även variabilitet eller stokastisk osäkerhet)

Epistemisk osäkerhet: Kunskapsosäkerhet

Fysisk planering: Aktivitet som syftar till att bestämma hur mark och vatten skall användas

Individrisk: Plats-specifik risk. Sannolikheten att en fiktiv person omkommer om denne står på en specifik plats under ett år

PERT-fördelning: En speciell form av betafördelning som kan användas för indata som härrör från expertutlåtanden

Samhällsrisk: Ett mått på den påverkan en olycka kan ha på en grupp personer som befinner sig i effektzonen av en olycka

Lista över förkortningar

ADR-S: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. "S" indikerar svensk anpassning

BLEVE: Boiling liquid expanding vapor explosion

CCPS: Center for Chemical Process Safety

DNV: Det Norske Veritas, företag som arbetar med certifiering av bland annat ledningssystem

F/N: Frequency/Number. Frekvens (F) och antal döda (N). Kan ritas i en graf för att presentera samhällsrisk

FOA: Försvarets forskningsanstalt

IR: Individrisk

ISO: International Organization for Standardization

LHS: Latin hypercube sampling

LSO: Lag (2003:778) om skydd mot olyckor

MB: Miljöbalk (1998:808)

MCM: Monte Carlo-metoden

MSB: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (tidigare Räddningsverket)

MSBFS: Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps författningssamling

PBL: Plan- och bygglag (2010:900)

PLL: Potential Loss of Life

RID-S: The Regulation concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail. "S" indikerar svensk anpassning

RIKTSAM: Riktlinjer för riskhänsyn i samhällsplaneringen

SFS: Svensk författningssamling

SKL: Sveriges Kommuner och Landsting

QRA: Kvantitativ riskanalys (Quantitative Risk Assessment)

ÅDT: Årsmedeldygnstrafik

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och frågeställningar.....	2
1.3	Avgränsningar.....	3
2	Teori	4
2.1	Risk	4
2.2	Transport av farligt gods	5
2.3	Riskhantering vid transport av farligt gods	6
2.3.1	Etablering av kontext	7
2.3.2	Riskidentifiering	7
2.3.3	Riskanalys	8
2.3.4	Riskvärdering.....	9
2.4	Styrande dokument och riktlinjer	14
2.5	Osäkerhet inom riskhantering	17
2.5.1	Typer av osäkerheter	17
2.5.2	Hantering av osäkerheter i riskutredningar.....	18
3	Metod.....	20
3.1	Identifiering och inhämtning av indataparametrar.....	20
3.2	Tillskrivning av fördelningar.....	21
3.3	Beräkningar, simuleringar och känslighetsanalys.....	23
3.4	Resultat, diskussion och slutsats	23
4	Identifiering av indataparametrar i jämförelsestudie	24
4.1	Indataparametrar	25
4.1.1	Fördelning av ämnesklasser	26
4.1.2	Mängder som transporteras av respektive ämnesklass.....	27
4.1.3	Frekvens för olycka med farligt gods.....	27
4.1.4	Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass.....	28
4.1.5	Topografi och väderförhållanden.....	28
4.1.6	Befolkningstäthet och andel av befolkningen inomhus respektive utomhus ...	29
4.1.7	Representativt ämne.....	31
4.1.8	Skadekriterier.....	31
4.1.9	Tryck och temperatur i tank.....	31
4.1.10	Källstyrka	31
4.1.11	Spridningsvinkel.....	33

4.1.12	Poissons kvot och kontraktionsfaktor	33
4.1.13	Nedre brännbarhetsgräns	34
4.2	Sammanställning av parametrar	34
5	Resultat av beräkningsmodell	35
5.1	Behandling av indataparametrar	35
5.1.1	Fördelning av ämnesklasser	36
5.1.2	Mängder som transporteras av respektive ämnesklass.....	38
5.1.3	Frekvens för olycka med farligt gods.....	38
5.1.4	Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass.....	38
5.1.5	Topografi och väderförhållanden.....	38
5.1.6	Befolkningstäthet och andel av befolkningen inomhus respektive utomhus ...	39
5.1.7	Representativt ämne.....	39
5.1.8	Skadekriterier.....	40
5.1.9	Tryck och temperatur i tank.....	40
5.1.10	Källstyrka	40
5.1.11	Spridningsvinkel.....	41
5.1.12	Poissons kvot och kontraktionsfaktor	41
5.1.13	Nedre brännbarhetsgräns	41
5.2	Konsekvensberäkningar	41
5.2.1	Ämnesklass 2.1. Brandfarliga gaser.....	42
5.2.2	Ämnesklass 2.3. Giftiga gaser	49
5.2.3	Ämnesklass 3. Brandfarliga vätskor	53
5.3	Individrisk.....	58
5.4	Samhällsrisk	63
6	Diskussion	71
6.1	Behandling av indataparametrar	71
6.2	Konsekvensberäkningar	72
6.2.1	BLEVE	73
6.2.2	Jetflamma	73
6.2.3	Giftigt gasmoln.....	73
6.2.4	Pölbrand	74
6.3	Individrisk.....	74
6.4	Samhällsrisk	75
6.5	Osäkerheter och felkällor	76
7	Slutsats.....	78
8	Referenser	80

Bilaga A	Beräkningar av konsekvensavstånd	1
A.1	Värmestrålning.....	2
A.2	Gasspridning.....	3
A.2.1	Modell för passiv spridning från kontinuerligt utsläpp	3
A.2.2	Modell för tunggasspridning från kontinuerligt utsläpp.....	5
A.2.3	Koncentrationsmått.....	5
Bilaga B	Känslighetsanalyser	7
Bilaga C	Övriga data och samband	12

1 Inledning

I följande kapitel presenteras bakgrund, syfte och frågeställningar, metod, frågeställningar och avgränsningar för examensarbetet.

1.1 Bakgrund

I samband med ny- och ombyggnation eller fysisk planering i Sverige krävs ofta en riskutredning för att säkerställa att förändringen inte medför oacceptabla risknivåer (Länsstyrelserna i Skåne, Stockholms och Västra Götalands län, 2006). Exempelvis kan olika typer av farlig verksamhet förekomma i området eller dess närhet. I dessa fall medför en förtätning av området en förhöjd risk då fler människor utsätts för den potentiella faran (Torretta et al., 2017).

Det är generellt önskvärt att höja såväl kvalitet som transparens i riskutredningar. Exempelvis Gooijer, Cornil & Lenoble (2012) utvärderade olika tillvägagångssätt i riskanalyser och kartlade deras metodik. Dessa författare menar att expertbedömningar generellt är tillförlitliga, men att deras objektivitet går att ifrågasätta (Gooijer, Cornil & Lenoble: 2012: 106). Tugnoli et al. (2013) försökte komma fram till vilka slutkonsekvenser i riskutredningar vid fysisk planering som är mest relevanta att ta i beaktning. Vidare eftersträvade dessa författare att bidra till att uppnå enhetlighet i underlaget för beslutsfattande vid fysisk planering. Författarna kunde också visa att beräkningsdelen och slutsatsen av en riskutredning påverkas i hög grad av vilka slutkonsekvenser som identifieras (Tugnoli et al., 2013: 626-627). Ett förtydligande kring vad som i detta examensarbete menas med slutkonsekvens framgår i Tabell 4 i avsnitt 4.

Det är allmänt vedertaget att det är viktigt att upprätthålla erforderligt skyddsavstånd mellan farliga verksamheter och det som anses vara skyddsvärt. Syftet med ett sådant skyddsavstånd är att reducera risken för industriella olyckor och därmed den totala risk som boende i området utsätts för. Det finns europeisk lagstiftning, det så kallade Seveso-direktivet, som reglerar hur säkerhetsarbete skall genomföras. Detta direktiv säkerställer att tekniska råd systematiskt tas i beaktning när det kommer till fysisk planering (Cozzani et al., 2006; Christou, Gyenes & Struckl, 2011). Om verksamheter som hanterar farligt gods finns i närheten av eller inom ett planområde som skall utredas behöver även den risk som transporter av farligt gods ger upphov till behandlas i en riskutredning.

Vid riskutredningar som behandlar transport av farligt gods vid fysisk planering genomförs flertalet beräkningar vilka inkluderar antaganden och approximationer när indataparametrar ska bestämmas (Khorsandi & Aven, 2017). Många av dessa indataparametrar grundar sig på senaste tillgängliga statistik. Generellt i riskutredningar är en del antaganden ofta löst grundade och har inte alltid en stark vetenskaplig förankring (Berner & Flage, 2016; Paskan, Rogers & Mannan, 2017). På grund av kraven som ställs på riskutredningar i lagar, förordningar, föreskrifter och andra regler är det av intresse att undersöka indataparametrarna som beräkningsmodeller som används i branschen bygger på (SKL, 2012: 14). I synnerhet är det av intresse att undersöka de parametrar som har en kombination av stor osäkerhet och stor inverkan på den totala riskbilden.

Detta examensarbete tar sin utgångspunkt i det tidigare examensarbetet *Jämförelsestudie av riskbedömningar avseende vägtransport av farligt gods* av Alvarsson & Jansson (2016). Jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) syftade till att öka medvetenheten angående de moment och parametrar där skillnaderna och osäkerheterna mellan olika riskutredningar är störst. Jämförelsestudien hade även som syfte att utreda hur väl generella kriterier för kvalitet uppfylls i de riskbedömningar som undersökts. I sin sammanfattning skriver dessa författare att deras jämförelsestudie ligger till grund för vidare utveckling av hur riskbedömningarna bör utformas och genomföras. Alvarsson & Jansson (2016) kartlägger och beskriver dessa skillnader i syfte att öka medvetenheten kring de moment och parametrar där osäkerheten och variationen är som störst.

I jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) förekommer inte något försök till kvantifiering av effekterna av dessa skillnader. I föreliggande examensarbete ämnas således en sådan kvantifiering genomföras. Genom att extrahera relevanta data från jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) är målet att identifiera indataparametrar och antaganden som karakteriseras av stora osäkerheter och av att ha stor effekt på den totala riskbilden. Med utgångspunkt i dessa indataparametrar skall konsekvensavstånd för ett antal slutscenarier beräknas. Senare skall även individ- och samhällsrisk beräknas. På detta sätt kan osäkerheternas effekter kvantifieras. Därefter är förhoppningen att nå fram till konkreta förbättringsförslag i form av generella råd och riktlinjer.

Målet för detta examensarbete är att bidra till att höja kvaliteten på riskutredningarna som görs i dagsläget genom att kvantifiera effekten av variationen hos indataparametrar i riskutredningar. Vidare är målsättningen att belysa effekten av denna variation vilket kan leda till mer välgrundade beslut när det gäller riskhantering vid fysisk planering.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att kvantifiera effekten som sedvanliga antaganden och deras osäkerheter har på resultaten i riskutredningar som fokuserar på risker kopplade till transport av farligt gods vid fysisk planering. En målsättning är att genom en sådan kvantifiering kunna utröna vilka antaganden som har störst inverkan på resultaten i denna typ av utredningar. Ytterligare en målsättning är att undersöka huruvida det finns ny information att tillgå för att revidera dessa antaganden eller minska deras osäkerheter. De frågeställningar som kommer att behandlas i detta examensarbete följer nedan.

- Vilka antaganden om indataparametrar förekommer vanligen i riskutredningar?
- Hur kan man kvantitativt bedöma hur stora osäkerheterna i dessa indataparametrar/antaganden är?
- Hur påverkar dessa osäkerheter riskutredningarnas resultat?
- Vilka indataparametrar har störst påverkan på resultaten?

1.3 Avgränsningar

För att begränsa examensarbetets omfattning har en del avgränsningar gjorts. I detta examensarbete behandlas endast riskerna som uppstår till följd av transport av farligt gods och således utesluts exempelvis risker som är direkt kopplade till industrier som bedriver farlig verksamhet. Ytterligare avgränsningar beskrivs nedan:

- Endast oavsiktliga och oförutsedda olyckor som härrör från transport av farligt gods beaktas. Risker som emanerar från antagonistiska hot beaktas ej.
- Konsekvenser av inträffade olyckor begränsas i detta examensarbete till förlust av människoliv och skada på människors fysiska hälsa då dessa anses vara mest skyddsvärda ur ett samhällsperspektiv. Således beaktas inte skador på miljö och egendom.
- Med transport av farligt gods avses i detta examensarbete en representativ sträcka för transport av farligt gods i anslutning till bebyggelse. Därmed avses exempelvis ej transport av farligt gods i tunnlar eller rangeringsområden.

2 Teori

I följande kapitel kommer teori och andra väsentliga begrepp för examensarbetet att behandlas. En del av de begrepp som berörs i detta examensarbete har inte allmänt vedertagna definitioner varför det är viktigt att definiera dessa. Sådana begrepp kommer att förtydligas i detta kapitel.

2.1 Risk

Risk är ett brett begrepp och *Center for Chemical Process Safety (CCPS)* menar att det finns flera sätt att beskriva och definiera detta (CCPS, 2009). Det bedöms därför viktigt att redogöra för begreppets innebörd för att undvika tvetydighet. På grund av detta behöver begreppet risk definieras tydligt i detta examensarbete (Frank & Jones, 2010). Det har tidigare gjorts försök att komma fram till en allmängiltig definition av risk som kan leda till gemensamma föreställningsramar och förtydligande av begreppet. Ett sådant försök har gjorts av Kaplan och Garrick (1981) som definierar risk som svaret på de tre följande frågorna:

1. Vad kan hända?
2. Hur sannolikt är det att händelsen inträffar?
3. Vad blir konsekvenserna om händelsen inträffar?

Kaplan och Garrick (1981) skriver att begreppet risk kan uttryckas med hjälp av denna tripplett som består av $\langle s_i, p_i, x_i \rangle$, där s är en hypotetisk händelse, p är sannolikheten att denna händelse inträffar och x är en beskrivning av den konsekvens som händelsen ger upphov till om den inträffar. För att formalisera sin definition och för att begreppet ska innefatta samtliga tänkbara händelser beskriver författarna risk med hjälp av Ekvation 1 nedan.

$$R = \{ \langle s_i, p_i, x_i \rangle \} \quad \text{Ekvation 1}$$

I ovanstående ekvation omges trippletten med händelserna s , sannolikheterna p , och konsekvenserna x av en klammerparentes för att risken R ska beskrivas som mängden av samtliga trippletter av händelser, sannolikheter och konsekvenser som är möjliga (Kaplan & Garrick, 1981).

Det finns många andra definitioner av risk. *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)* definierar i enlighet med MSBFS 2016:7 risk som en sammanvägning av sannolikheten att en händelse inträffar och de konsekvenser som denna händelse kan leda till. Denna definition används även av MSB när det kommer till riskhantering inom fysisk planering (MSB, 2015). Swedish Standards Institute (2009) har publicerat standarder som innehåller principer och generella riktlinjer för riskhantering. I standarden ISO 31000 definieras risk som osäkerheten att uppnå mål. En effekt i detta fall definieras som en positiv eller negativ avvikelse från det som är förväntat.

I detta examensarbete kommer definitionen av Kaplan & Garrick (1981) att användas eftersom denna anses vara mest tillämpbar och den definition som av hävd används i

riskutredningar avseende transport av farligt gods vid fysisk planering (Alvarsson & Jansson, 2016).

2.2 Transport av farligt gods

Transport av farligt gods en betydande och självklar roll i samhället eftersom dessa ämnen kan komma till användning inom många olika områden. Exempelvis kan farligt gods användas som drivmedel och till industriella verksamheter. Med farligt gods avses ämnen och produkter vars kemiska och fysikaliska beskafter medför att de kan orsaka skador på liv, hälsa, miljö eller egendom. Exempel på klasser av farligt gods är explosiva ämnen och föremål, gaser, brandfarliga vätskor samt oxiderande ämnen och organiska peroxider. Exempel på ämnen som avses är bensin, gasol, fyrverkerier, sprayburkar eller väteperoxid (MSB, 2017).

Gällande transport delar MSB in farligt gods i nio olika huvudklasser samt ett antal underklasser baserat på godsets kemiska och fysikaliska egenskaper. Dessa klasser återges i Tabell 1 nedan. Vidare är det avsändarens ansvar att godset är fullständigt klassificerat enligt ADR-S / RID-S. Utöver klass måste godset förses med klassificeringskod, förpackningsgrupp, UN-nummer, officiell transportbenämning, varningsetiketter samt uppgifter kring miljöfarlighet (MSB, 2017).

Tabell 1. Klassificering av farligt gods enligt ADR-S (MSB, 2017).

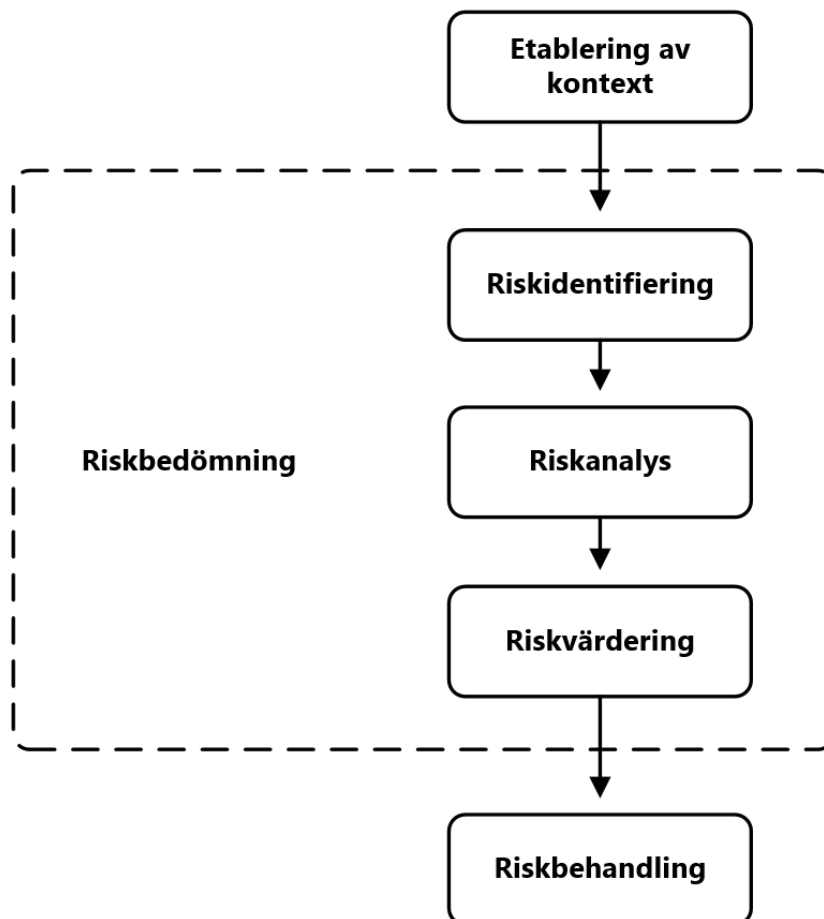
Ämnesklass	Beskrivning av ämnesklass
1	Explosiva ämnen och föremål
2.1	Brandfarliga gaser
2.2	Icke brandfarliga, icke giftiga gaser
2.3	Giftiga gaser
3	Brandfarliga vätskor
4.1	Brandfarliga fasta ämnen, självreaktiva ämnen och fasta okänsliggjorda
4.2	Självantändande ämnen
4.3	Ämnen som utvecklar brandfarliga gaser vid kontakt med vatten
5.1	Oxiderande ämnen
5.2	Organiska peroxider
6.1	Giftiga ämnen
6.2	Smittförande ämnen
7	Radioaktiva ämnen
8	Frätande ämnen
9	Övriga farliga ämnen och föremål

De ämnesklasser som i huvudsak behandlas när det rör sig om transport av farligt gods är de som kan förknippas med slutkonsekvenserna brand, explosion och utsläpp av giftiga eller frätande kemikalier. De faktorer som påverkar omfattningen av en olycka är bland annat mängd och typ av gods som transporterats, vilka väderförhållanden som råder och hur långt från olycksplatsen som människor eller bebyggelse befinner sig (SKL, 2012). Transporter av farligt gods omgärdas av regelverk för att minimera de potentiella konsekvenser som ett eventuellt utsläpp kan leda till. Detta behandlas mer ingående i avsnitt 2.4 nedan.

Vanligtvis delas det rekommenderade vägnätet för farligt gods upp i primära respektive sekundära transportleder. Med primära transportleder avses de transportleder som är rekommenderade för att användas som genomfartstrafik för farligt gods. Med sekundära transportleder avses de transportleder som främst lämpar sig för lokala transporter mellan primära transportleder och leverantör eller recipient av farlig verksamhet. Sekundära transportleder bör således inte brukas som genomfartstrafik för farligt gods (SKL, 2012).

2.3 Riskhantering vid transport av farligt gods

I detta examensarbete berörs riskutredningar med avseende på vägtransport av farligt gods. I sådana riskutredningar görs en bedömning av de risker som är kopplade till exempelvis ny- och ombyggnationer. Riskbedömningen i sig är en del av processen som benämns riskhantering. Riskhanteringsprocessen avser en uppsättning aktiviteter och metoder som används för att kontrollera de risker som kan påverka förmågan att uppnå mål (Swedish Standards Institute, 2009). I Figur 1 nedan illustreras schematiskt riskhanteringsprocessens olika delsteg och deras inbördes förhållande till varandra.



Figur 1. Överblick av riskhanteringsprocessen och dess olika delar (Swedish Standards Institute, 2009).

I ovanstående bild är riskhanteringsprocessen tämligen generaliserad och går således att applicera på flertalet olika områden. En närmare beskrivning av hur riskutredningar beträffande transport av farligt gods vid fysisk planering sedvanligt är utformade görs i nedanstående delkapitel.

2.3.1 Etablering av kontext

Genom att etablera en kontext avses att syften, mål, strategier, avgränsningar och omfattning, ansvarsområden och riskbedömningskriterier definieras. Dessa är generella principer som kan appliceras i en godtycklig riskhanteringsprocess (Swedish Standards Institute, 2009).

När det kommer till riskutredningar som specifikt behandlar transport av farligt gods vid fysisk planering inleds vanligtvis med att fastställa syfte och bakgrund samt omfattning och avgränsningar enligt ett likartat tillvägagångssätt som för det generella fallet ovan. Detta görs utifrån beställarens kravspecifikation. Det är även i etableringen av kontext som en beskrivning görs av det område som ska undersökas i riskutredningen eftersom detta område är starkt knutet till detaljeringsgraden som riskutredningen (Cedergren & Hassel, 2017). Riskbedömningskriterier upprättas även i detta steg för att uppnå en objektiv och liktydig uppskattning av de risker som skall beräknas i riskanalysen (Slettenmark, 2003). Detta beskrivs i närmare detalj senare i detta kapitel under avsnitt 2.3.4.5.

Beträffande omfattning och avgränsningar bestäms det i regel att risker som studeras i utredningar uteslutande rör sig om sådana som är associerade med plötsligt inträffade händelser, det vill säga olyckor som kan kopplas till de transportsträckor som är närliggande till det område som undersöks. Transportsträckorna som befinner sig i närheten av det område som undersöks identifieras därför även i detta steg. En naturlig avgränsning som görs är därför den geografiska omfattningen. Ett vanligt sätt att förmedla relevant information om detta är att bifoga en karta och markera särskilda skyddsvärden såsom sjukhus och skolor. (Cedergren & Hassel, 2017).

Begreppet risk i samhällsplanering ställs alltid i förhållande till något som anses vara skyddsvärt. Vad som är skyddsvärt är kontextuellt och varierar således mellan olika situationer. Beroende på sammanhang kan det skyddsvärda utgöras av exempelvis människors liv och hälsa, miljö eller egendom. På grund av detta är identifiering av det skyddsvärda ett viktigt steg i riskhanteringsprocessen. Det finns även anledning att rangordna det som är skyddsvärt då tid och resurser alltid är begränsade (Cedergren & Hassel, 2017). I praktiken översätts detta i riskutredningen till att konsultfirman som utför riskutredningen enligt praxis endast tar hänsyn till konsekvenser i form av skada på personer och således inte tar i beaktning andra skador som kan uppkomma på miljö eller egendom.

2.3.2 Riskidentifiering

Swedish Standards Institute (2009) utgår från en verksamhet när riskhanteringsprocessen definieras och diskuteras. I detta examensarbete utgörs verksamheten av fysisk planering. Vid fysisk planering är ett övergripande mål att värna om människors liv och hälsa. Det betonas att en verksamhet skall implementera riskidentifieringen på ett sätt som är kompatibelt med dess övergripande mål och förmågor. En verksamhet bör vara förmögen att identifiera potentiella riskkällor och händelser samt deras orsak och möjliga konsekvenser. Transport av farligt gods är en återkommande riskkälla i samband med fysisk planering då olyckor kan inträffa.

I detta steg av riskhanteringsprocessen är målet att producera en omfattande lista över risker som grundar sig på de händelser som tidigare identifierats. Även risker som härstammar från källor utanför verksamhetens kontroll bör identifieras. Utöver vad som kan inträffa bör orsaker och konsekvenser identifieras. Möjliga scenarier bör kartläggas samt vilka konsekvenser respektive scenario innebär (Swedish Standards Institute, 2009).

När det kommer till fysisk planering och riskutredningar som tas fram i samband med detta rangordnas vanligtvis människors liv väldigt högt. Andra vanliga identifierade skyddsvärden är exempelvis samhällseliga funktioner, infrastruktur och miljö. Utifrån de skyddsvärden som identifierats i steget etablering av kontext fastställs i detta steg vilka händelser som kan utgöra risker för dessa (Cedergren & Hassel, 2017). I detta examensarbete kommer endast risken att människor förolyckas att tas i beaktning. Några av de slutkonsekvenser som vanligen beaktas i dessa sammanhang är explosion, jetflamma, giftigt gasmoln, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) och pölbrand.

2.3.3 Riskanalys

I denna del av processen skall en djupare förståelse för riskerna utvecklas. Syftet med riskanalysen är att producera ett underlag som sedan kan användas i riskvärderingen. Analysen syftar även till att underlätta beslutsfattande där de olika valen innefattar olika typer och nivåer av risk. Analysen inkluderar att beakta riskernas orsaker och källor, deras konsekvenser (både positiva och negativa) samt konsekvensernas sannolikheter (Swedish Standards Institute, 2009). Konsekvenserna och sannolikheterna bör presenteras på ett sätt som återkopplar till riskutredningens syfte och utformning. När konsekvenserna och sannolikheterna kombineras för att avgöra risknivån bör det utformas på ett sätt som reflekterar typen av risk (Swedish Standards Institute, 2009).

Det finns oftast många osäkerheter kring indatan och antaganden (Berner & Flage, 2016). Därför är det viktigt att ha dessa osäkerheter i åtanke när man fastslår risknivån. Vidare är det viktigt att förmedla dessa osäkerheter på ett effektivt sätt till berörda beslutsfattare och intressenter. Intressekonflikter mellan intressenter, skiljaktigheter i expertbedömningar samt begränsningar hos aktuell beräkningsmodell bör explicit nämnas och belysas (Swedish Standards Institute, 2009).

Detaljeringsgraden i analysen kan variera beroende på analysens syfte, tillgängligt information och data, samt resurser. Beroende på rådande situation kan analysen vara kvalitativ, semi-kvantitativ, kvantitativ eller en kombination av dessa.

I riskutredningar vid fysisk planering innefattar riskanalysen en karakterisering av de risker som identifierats tidigare. Detta görs genom att erhålla mer information om frekvens och konsekvens för respektive identifierad risk. Vidare varierar detaljeringsgraden av karakteriseringen, vilket påverkar precisionen och osäkerheten i resultatet av riskanalysen. En vanlig egenskap hos konsekvenser är förhållandet mellan deras sannolikhet och omfattning. Stor omfattning innebär i regel låg sannolikhet och vice versa. I praktiken innebär detta att somliga händelser beaktas i stor utsträckning trots sin låga sannolikhet på grund av tillhörande allvarliga konsekvenser (Cedergren & Hassel, 2017).

Vid fysisk planering är den geografiska aspekten av stort intresse då ett centralt sätt att reducera risker är att separera det som är skyddsvärt från potentiella riskkällor spatialt. Följaktligen är kartor ett användbart verktyg i detta steg. En karta över aktuellt område med markerade skyddsvärden, riskkällor och deras konsekvensavstånd i form av individriskkonturer utgör ett användbart element för att kunna överblicka situationen (Cedergren & Hassel, 2017).

2.3.4 Riskvärdering

Syftet med riskvärdering är att skapa ett underlag för att på ett lättare sätt kunna fatta beslut baserade på resultaten i riskanalysen. Genom att utföra en riskvärdering går det att avgöra vilka risker som behöver behandlas ytterligare och vilken prioritet de olika åtgärderna ska ha. Riskvärderingen inbegriper en jämförelse av risknivån som estimerats i riskanalysen med de kriterier som tidigare upprättats när kontexten etablerats. Det är utifrån denna jämförelse med dessa riskkriterier som behovet för behandling av risken kan fastställas (Swedish Standards Institute, 2009).

När beslut som tas gällande att vidta åtgärder för risker behöver en vidare kontext beaktas för att ta hänsyn till helhetsbilden. I riskvärderingen bör det därför fästas avseende vid andra parter riskbenägenhet för att få en holistisk bild. Därutöver måste beslut fattas i enlighet med de lagar, regler och andra krav som finns i det område där åtgärder ska vidtas (Swedish Standards Institute, 2009).

I riskutredningar vid fysisk planering sammanfogas tidigare utförda steg i riskvärderingen för att dra slutsatser om riskbilden. I tidigare steg skapades grunden för att beskriva olika slutscenarier. I detta steg väljs de mest relevanta slutscenarier ut och beskrivs i ytterligare detalj (Cedergren & Hassel, 2017).

När de olika slutscenarierna konstrueras och beskrivs finns det ett antal riktlinjer som bör följas. Kaplan, Haimes & Garrick (2001) skriver att scenarierna skall vara (1) kompletta, (2), finita samt (3) disjunkta. Detta beskrivs vidare av Cedergren & Hassel (2017) med att slutscenarierna bör innefatta samtliga potentiella händelser som överskrider en viss nivå av påverkan. Således undantas händelser med negligerbara konsekvenser. Varje slutscenario bör beskrivas med en tillräcklig detaljeringsgrad. Vidare skall samtliga slutscenarier vara ömsesidigt uteslutande och således inte överlappa varandra.

Processen då slutscenarierna konstrueras kantas av ytterligare val och avvägningar som bör höras. Ju fler slutscenarier som beaktas, desto sämre blir möjligheten att i detalj analysera respektive scenario. Fler slutscenarier innebär också att det blir svårare att skapa en aggregerad bild av de risker som råder i det undersökta området (Cedergren & Hassel, 2017).

2.3.4.1 Individrisk

Det finns olika definitioner av begreppet individrisk. Den vanligaste definitionen av individrisk i fysisk planering är "platsspecifik individrisk". Enligt denna definition är individrisken sannolikheten per år att en hypotetisk person omkommer om denne oavbrutet vistas på en bestämd plats i närheten av ett riskobjekt (Slettenmark, 2003). Det är denna definition av individrisk som kommer att användas i detta examensarbete.

Individrisk beräknas enligt Ekvation 2 nedan (CCPS, 2000).

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i} \quad \text{Ekvation 2}$$

$IR_{x,y}$	Total individrisk på den geografiska platsen (x, y) . Sannolikhet att omkomma per år	[år ⁻¹]
$IR_{x,y,i}$	Individrisk på den geografiska platsen (x, y) . Sannolikhet att omkomma per år till följd av slutkonsekvens i	[år ⁻¹]
n	Antal slutkonsekvenser som beaktas i analysen	[-]

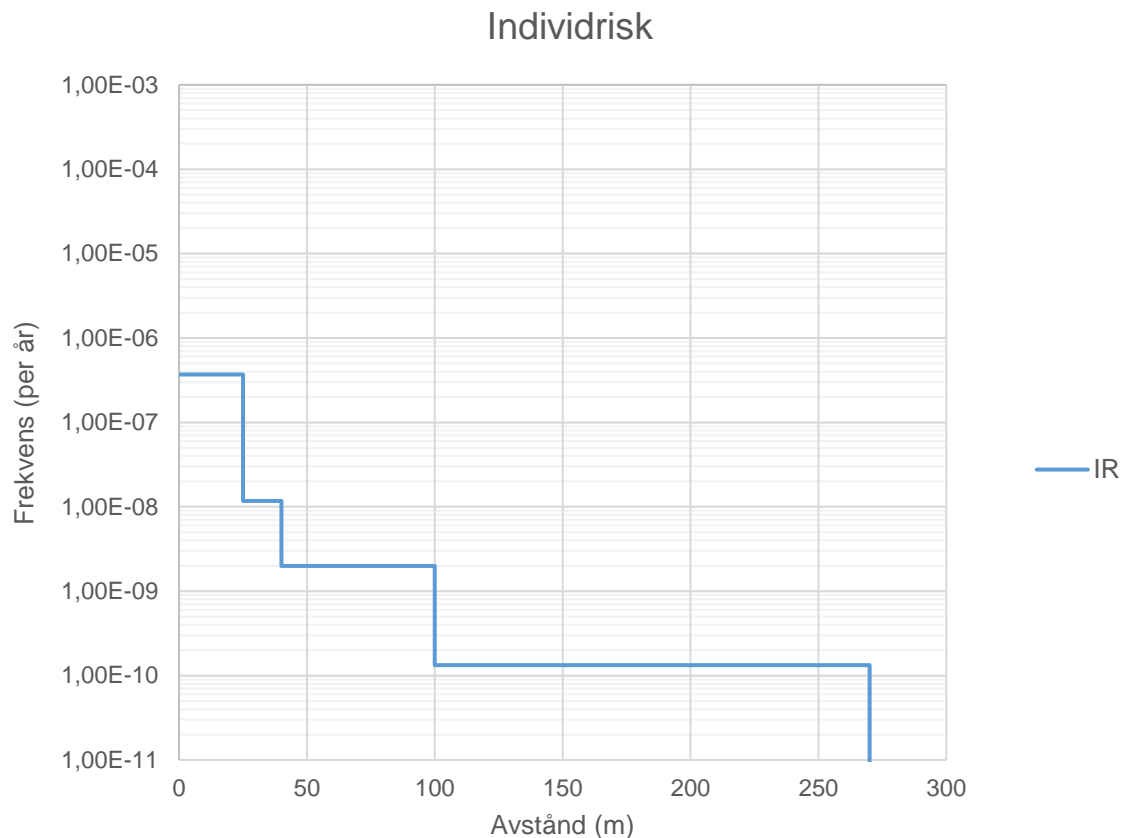
Ovanstående ekvation bygger på antagandet att riskbidraget från samtliga slutkonsekvenser är additiva.

Vidare beskriver Ekvation 3 nedan sannolikheten att omkomma per år till följd av slutkonsekvens i på den geografiska platsen (x, y) beräknas

$$IR_{x,y,i} = f_i \cdot p_{f,i} \quad \text{Ekvation 3}$$

f_i	Frekvens för slutkonsekvens	[år ⁻¹]
$p_{f,i}$	Sannolikhet att en slutkonsekvens i resulterar i dödsfall på den geografiska platsen (x, y)	[år ⁻¹]

Vid transport av farligt gods presenteras individrisken sedan vanligen som en funktion av avståndet från transportleden. I Figur 2 nedan presenteras ett exempel på en individriskprofil.

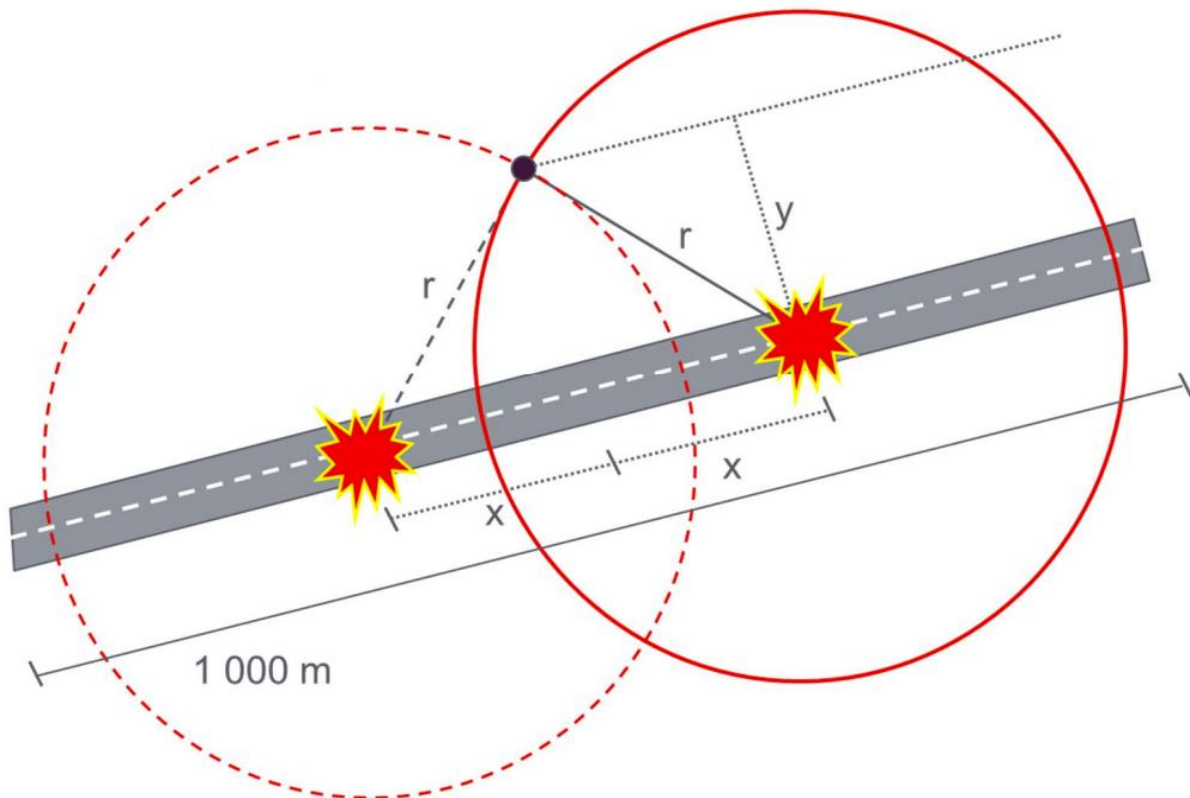


Figur 2. Exempel på individriskprofil.

2.3.4.2 Individriskkonturer

Individriskkonturer kartlägger den geografiska fördelningen av individrisken. Dessa konturer är baserade på slutkonsekvensernas konsekvensavstånd. Vidare görs antagandet att sannolikheten att omkomma inom effektzonen är 1 medan sannolikheten för att omkomma utanför effektzonen är 0. Detta är en vedertagen förenkling för att förmedla individriskkonturer (CCPS, 2000: 412). Ytterligare ett antagande som individriskkonturer bygger på är att riskkällan är kompakt så att den kan approximeras till en punkt. Vidare antas att slutkonsekvensen har en jämn utbredning i alla riktningar (CCPS, 2000: 402).

För somliga slutkonsekvenser behöver justeringar göras då dessa konsekvenser ej har cirkulär utbredning. Även när det kommer till transport av farligt gods måste denna metod justeras. Detta beror på att riskkällan inte kan approximeras till en punkt utan istället behandlas som en linje. Grundfrekvensen för olycka anges vanligtvis per kilometer och således justeras beräkningen av individrisk baserat på detta. I Figur 3 nedan återges en schematisk bild för att tydliggöra förfarandet.



Figur 3. Justering av frekvens för olycka vid transport av farligt gods (WSP, 2011).

En olyckas konsekvensavstånd beräknas i detta examensarbete med hjälp av de modeller som presenteras i Fischer et al. (1998). Detta konsekvensavstånd benämns i Figur 3 ovan som r . För att slutkonsekvensen med konsekvensavstånd r skall påverka en punkt på avståndet y måste denna inträffa någonstans på sträckan $2x$. Sträckan $2x$ kan beräknas med hjälp av Pythagoras sats och på så vis kan frekvensen justeras (WSP, 2011). Detta beräkningsförfarande används för att justera grundfrekvensen för en olycka. Därefter beaktas även utbredningen hos respektive slutkonsekvens.

2.3.4.3 Spridningsvinkel

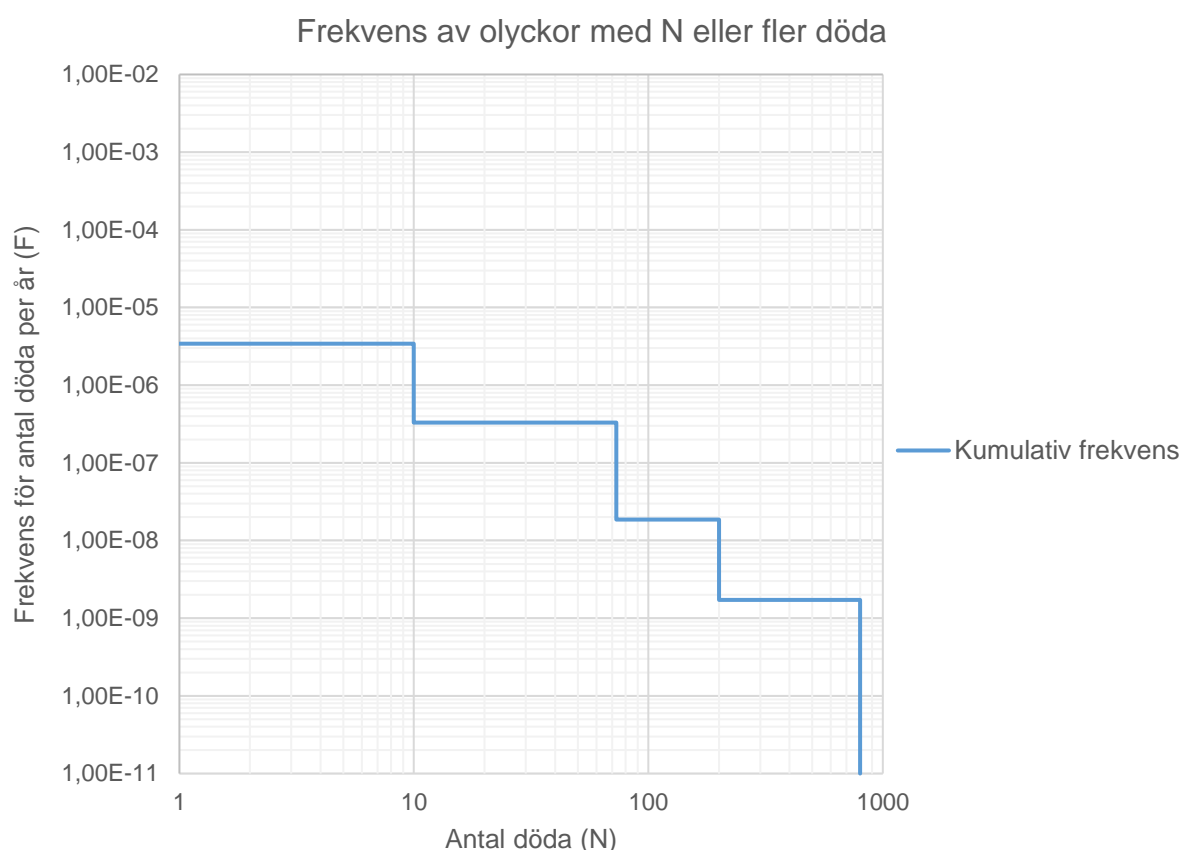
För att beräkna individriskbidraget från somliga slutkonsekvenser behöver en korrigerande faktor för spridning tas i beaktning. Vanligen vid beräkning av individrisker för slutkonsekvenser där spridningsvinkel är relevant anges vinkeln 15 grader (CCPS, 2000: 593). Detta beror på att spridningen inte sker cirkulärt utan istället i form av en plym som ofta approximeras till en cirkelsektor.

2.3.4.4 Samhällsrisk

Somliga olyckor kan potentiellt orsaka skada på ett stort antal människor. Exempelvis kan detta vara i ett samhälle i omgivningen av en transportled. För att få ut en risknivå för människorna som befinner sig i det område som undersöks kan samhällsrisk beräknas. Samhällsrisk definieras som ett förhållande mellan frekvensen av olyckor och de konsekvenser som dessa olyckor ger upphov till (CCPS, 2000; Räddningsverket, 1997). Således är samhällsrisk ett mått på den påverkan en olycka kan ha på en grupp personer som befinner sig i olyckans effektzon. Detta mått uttrycks oftast som en frekvensfördelning av flera olyckshändelser (CCPS, 2009).

Vid beräkning av samhällsrisk behövs samma information om frekvens att förolyckas samt hur stort konsekvensområde som vid beräkning av individrisk. Utöver detta behövs även information om befolkningstätheten omkring riskkällan för att beräkna samhällsrisk (CCPS, 2000).

Frekvenser för slutkonsekvenser samt antal döda kopplade till respektive slutkonsekvens kan kombineras för att erhålla förväntat antal döda per år som ett mått på samhällsrisk. Detta mått benämns *Potential Loss of Life*, PLL (Räddningsverket, 1997). Ett annat vanligt sätt att presentera samhällsrisk är med hjälp av så kallade F/N-kurvor, vilket är det mått som huvudsakligen kommer att användas i detta examensarbete. I en F/N-kurva ritas antal döda (N) upp på x-axeln och ackumulerad frekvens (F) på y-axeln. Ett exempel på en F/N-kurva presenteras i Figur 4 nedan.



Figur 4. Exempel på F/N-kurva.

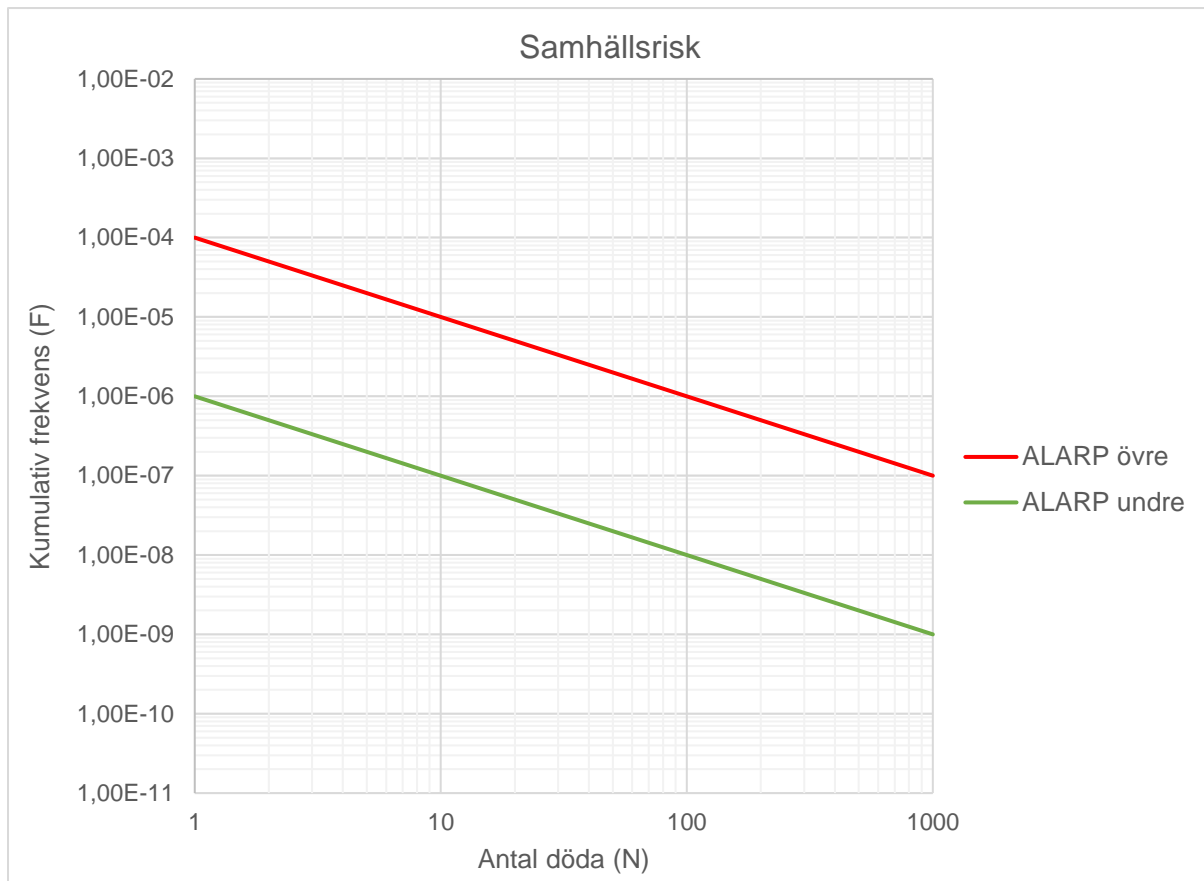
2.3.4.5 Acceptanskriterier

De Norske Veritas (DNV) har på uppdrag från Statens räddningsverk utarbetat rekommendationer på acceptanskriterier för individrisk (Räddningsverket, 1997). Dessa kriterier är de som används av praxis och som Länsstyrelsen godtar då det för närvarande inte finns något bättre underlag (Länsstyrelsen Stockholm, 2016).

De acceptanskriterier för individrisk som föreslås av DNV innebär att en övre gräns för ett område där risker kan tolereras under vissa förutsättningar är 10^{-5} per år och en övre gräns

för ett område där risker anses vara små är 10^{-7} per år. Det område som bildas mellan risknivåerna 10^{-5} respektive 10^{-7} benämns som området As Low As Reasonably Practicable (ALARP). Inom området ALARP behöver riskreducerande åtgärder genomföras såvida kostnaderna för dessa står i rimlig proportion i förhållande till den riskreduktion som åtgärderna ger upphov till (Räddningsverket, 1997).

För samhällsrisk innebär de acceptanskriterier för som föreslås av DNV att ju mer omfattande en olycka är, desto lägre risknivå anses vara tolerabel. De föreslagna acceptanskriterierna illustreras i Figur 5 nedan.



Figur 5. Förslag på acceptanskriterier enligt DNV.

Risker som är kopplade till transportaktiviteter blir större ju längre transportsträcka som medräknas i värderingen. På grund av detta skall acceptanskriterierna konsekvent tillämpas på en kilometers transportsträcka för att vara konsekvent (Räddningsverket, 1997).

2.4 Styrande dokument och riktlinjer

När det kommer till området fysisk planering finns det olika lagar och riktlinjer som styr hur arbetet skall inriktas. Det finns även lagar och riktlinjer om hur hänsyn skall tas till riskfrågor och säkerhet med avseende på människa och miljön. Några av de viktigaste styrande dokument presenteras i detta kapitel.

Plan- och bygglagen (2010:900) (PBL) föreskriver att aktuell länsstyrelse i uppgift att bistå med underlag och ge råd om säkerhet och hälsa vid fysisk planering (5 kap. 14 § 4 p.).

Länsstyrelsen är även enligt PBL skyldig att undersöka om planerade ny- eller ombyggnation lever upp till krav på säkerhet och skydd mot olyckor. I 2 kap. 5 § PBL ställs det även krav på att frågor kring säkerhet och hälsa skall besvaras i samband med planläggningen av byggnationen i form av detaljplaner.

Miljöbalken (MB) ska appliceras om en detaljplan i betydande omfattning kan påverka miljön i betydande omfattning. Ett övergripande mål med miljöbalken, SFS (1998:808), är att säkerställa en hälsosam miljö för nuvarande och kommande generationer genom att främja en hållbar utveckling. Föroreningar och annan påverkan skall motarbetas så att människor skyddas från skador och olägenheter. Det finns i MB även regler kring miljökonsekvensbeskrivning (MKB). En MKB ställer krav på att hänsyn skall tas till människors säkerhet och hälsa (Länsstyrelsen i Skåne län, 2007: 13). Det finns inga krav på att en MKB måste utarbetas som ett separat dokument utan kan integreras i planbeskrivningen. Det viktiga är att planen tydligt redogör för eventuell miljöpåverkan och hur den skall hanteras (Boverket, 2006: 60).

Lag (2003:778) om skydd mot olyckor (LSO) föreskriver att åtgärder ska vidtas av kommunen för att förebygga bränder och följder av dessa. I 2 kap. 4 § i denna lag redogörs för vilka skyldigheter som gäller för den som äger eller bedriver farlig verksamhet. Om en olycka vid en verksamhet kan orsaka allvarliga skador på människor eller miljön sägs verksamheten vara farlig. I dessa fall är den som bedriver verksamheten skyldig att inom rimliga gränser hindra eller begränsa sådana skador. Vidare säger lagen att verksamhetsutövaren är skyldig att analysera riskerna för dessa allvarliga olyckor.

RIKTSAM

Länsstyrelsen i Skåne län har tagit fram dokumentet Riktlinjer för riskhänsyn i samhällsplaneringen - Bebyggelseplanering intill väg och järnväg med transport av farligt gods (RIKTSAM). Detta dokument ställer inte direkta krav utan ämnar i stället utgöra riktlinjer samt underlätta hanteringen av riskfrågor vid fysisk planering. Vidare är syftet med att öka kunskapen kring riskfrågor och hanteringen av dessa vid samhällsplanering i anslutning till transportleder med farligt gods. Slutligen syftar RIKTSAM till att underlätta beslutsfattande genom att utgöra kunskapsunderlag. Riktlinjerna baseras på tre olika vägledning:

1. Baseras på skyddsavstånd
2. Baseras på deterministiska kriterier
3. Baseras på deterministiska och probabilistiska kriterier med avseende på individ-samhällsrisk

Syftet med dessa vägledningar i kombination med de riktlinjer som anges är att jämförbara säkerhetsnivåer skall finnas i samtliga fall. Dessa vägledningar och rekommendationer är applicerbara då detaljplaner inom 200 meter från transportled med farligt gods utarbetas. Rekommendationerna gällande skyddsavstånd varierar mellan olika kommuner. De schablonmässiga skyddsavstånden som slutligen anges i RIKTSAM är 30, 70 respektive 150 meter från transportleden. Det rekommenderade skyddsavståndet varierar beroende på vilken typ av bebyggelse eller verksamhet som planeras.

Dessa skyddsavstånd är framtagna baserade på beräknade individ- och samhällsrisker vid transportleder för farligt gods i Skåne. Underlaget för beräkningarna, inklusive osäkerheter

och antaganden redovisas i RIKTSAM. Två alternativ för väg studerades. Detaljerna för dessa återges i Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Detaljerad information om de två fall av väg som studerades i RIKTSAM.

Transportled	Hastighet (km/h)	ÅDT (antal fordon)	Fordon med farligt gods (antal)
Tvåfältsväg	90	15 000	50
Fyrfältsväg	110	60 000	80

Akronymen ÅDT står för årsmedeldygnstrafik och är en statistisk parameter. Med årsmedeldygn avses ett dygn med genomsnittlig trafikmängd under ett angivet år. Årsmedeldygnstrafik är alltså ett genomsnittligt trafikflöde per dygn mätt i fordon per dygn (Trafikverket, 2015).

Fördelningen mellan respektive huvudklass av farligt gods som transporteras varierar mellan väg och järnväg. I RIKTSAM användes genomsnittliga siffror för Sverige när fördelningen på väg ansattes. På järnväg användes en fördelning som är representativ för stambanan via Malmö. Detaljerna är sammanställda och återges i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Fördelning av respektive ämnesklass enligt RIKTSAM uppdelat efter väg respektive järnväg (Länsstyrelsen i Skåne län, 2007).

Ämnesklass	Andel på väg (%)	Andel på järnväg (%)
1	0,9	0,6
2	12,0	19,9
3	76,9	18,1
4	0,9	6,2
5	1,2	20,0
6	0,6	5,9
7	0,1	0,1
8	7,2	24,4
9	0,3	4,9

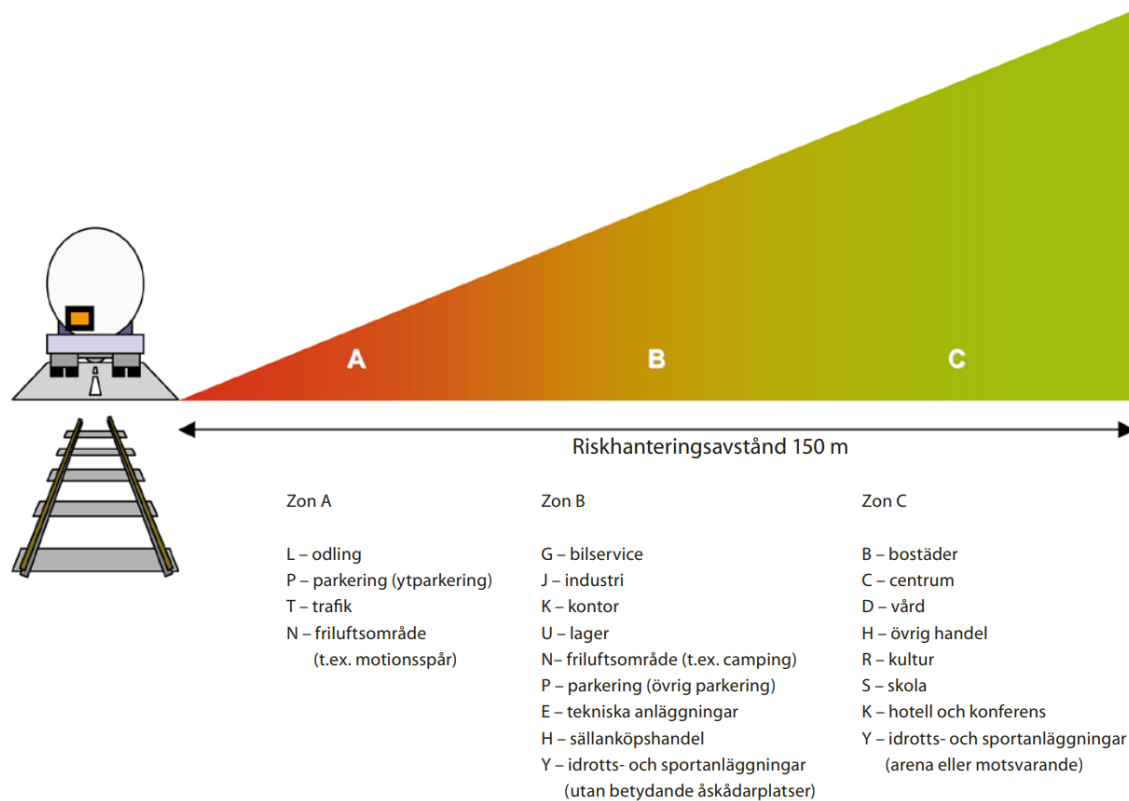
Att bibehålla bebyggelsefritt område eller att endast tillåta verksamheter som ej uppmuntrar stadigvarande vistelse inom 30 meter från transportleden motiveras med en markant reduktion av samhällsriskerna. På avstånd kortare än 30 meter överstiger individrisken 10^{-5} per år och ligger därmed ovanför den övre ALARP-gränsen.

På avståndet 30-70 meter från transportleden rekommenderas begränsad markanvändning. Verksamheter inom detta område bör vara av karaktären så att få personer vistas där och endast i vaket tillstånd. På avstånd kortare än 70 meter överstiger individrisken 10^{-6} per år och ligger därmed inom ALARP-området.

På avståndet 70-150 meter från transportleden behövs ingen närmare riskutredning för de flesta typer av verksamheter. Individrisken reduceras kraftigt med avståndet upp till 70 meter. Därefter är reduktionen mindre påtaglig.

På avståndet >150 meter från transportleden behövs ingen närmare riskutredning oaktat vilken typ av verksamhet som planeras. Individrisken vid detta avstånd är försumbar.

I Figur 6 nedan återges en översiktlig sammanfattning över vilken bebyggelse som rekommenderas på respektive avstånd.



Figur 6. Zonindelning för riskhanteringsavstånd. Zonerna representerar lämplig markanvändning i förhållande till transportled för farligt gods (Länsstyrelserna i Skåne, Stockholms och Västra Götalands län, 2006).

2.5 Osäkerhet inom riskhantering

Det finns olika sätt att beskriva osäkerhet. I detta kapitel beskrivs mer ingående vilka typer av osäkerheter som mest vanligen förekommer, hur dessa i nuläget hanteras i riskutredningar beträffande farligt gods vid fysiskplanering samt andra tillvägagångssätt som kan nyttjas för att bemöta osäkerheter.

2.5.1 Typer av osäkerheter

Inom riskhantering görs det ofta en distinktion mellan osäkerhet som härrör från naturlig variation (variabilitet) och osäkerhet som emanerar från bristande kunskap om bakgrunden till olika påståenden och ofullständig information om vilka orsakssamband som ligger bakom dessa påståenden (Flage, Aven & Berner, 2018). Osäkerhet som härstammar från naturlig variation kallas för aleatorisk osäkerhet och osäkerhet som emanerar från orsakssamband kallas för epistemisk osäkerhet. Osäkerhet i parametrar kan bestå av både naturlig variation och kunskapsosäkerhet. Ett exempel på detta är källstyrka där storleken är förknippad med aleatorisk osäkerhet medan sannolikhet för respektive storlek kan vara förknippad med epistemisk osäkerhet.

Det är möjligt att dela upp naturlig variation och kunskapsosäkerhet i ytterligare delgrupper. Exempelvis går det att konstatera att det finns osäkerheter i beräkningsmodeller som används för att till exempel modellera konsekvenser. Olika modeller kan ge olika resultat för samma scenario, exempelvis på grund av att olika beräkningsätt förekommer i modellen (Labovský & Jelemenský, 2013). Denna modellosäkerhet är en typ av kunskapsosäkerhet. Det är även sannolikt att de konsekvenser eller scenarier som en riskutredning behandlar inte är en fullständig representation av verkligheten. Denna completeness-osäkerhet är en relevant faktor att beakta i alla typer av riskutredningar (CCPS, 2000: 47).

2.5.2 Hantering av osäkerheter i riskutredningar

Det finns ett antal olika sätt att hantera osäkerheter i riskutredningar. I detta kapitel redogörs för ett antal av dessa tillvägagångssätt.

2.5.2.1 Konservativa antaganden

En av de vanligaste metoderna att hantera osäkerheter i riskutredningar är genom att använda sig av konservativa antaganden (Slettenmark, 2003: 19). I de fall som det råder osäkerheter om vissa parametrar betyder detta att dessa parametrar antas vara av en konservativ karaktär, vilket är innebär att värderingen görs med utgångspunkt i ett försiktighetsperspektiv. Avsikten med att göra konservativa antaganden är således att risken som är förknippad med det som utreds skall vara överskattad snarare än underskattad (Räddningsverket, 2003: 161).

Gällande transport av farligt gods vid fysisk planering kan konservativa antaganden innebära att endast det värsta fallet för en parameter beaktas. Exempelvis kan ett grundantagande om storleken på ett läckage vara att källstyrkan kommer att variera mellan 1 kg/s och 60 kg/s. Ett konservativt antagande är då att endast beakta och räkna på ett läckage med källstyrkan 60 kg/s, trots att ett troligare scenario kanske är en källstyrka på 30 kg/s.

Konservativa antaganden som tillvägagångssätt har sina brister. Med en begränsad budget skall riskreducerande åtgärder prioriteras. I sådana fall är det ej fördelaktigt om samtliga risker är överskattade till följd av konservativa antaganden (Paté-Cornell, 1996: 100). En riskutredning som i stor utsträckning baseras på konservativa antaganden och resulterar i oacceptabla risknivåer skulle kunna inkräkta på andra instressen (Aven, 2016), såsom strävan efter förtätning. Om utredningen fastställer ett större skyddsavstånd till följd av konservativa antaganden kan effekten bli att högt värderad mark används suboptimalt. Således finns det rimligtvis ett allmänintresse för att riskutredningar som görs i samband med fysisk planering är så realistiska som möjligt snarare än konservativa.

2.5.2.2 Intervallanalys

Ett sätt att hantera osäkerheter inom riskutredningar är att utforma så kallade intervall på de parametrar som behandlas. Detta innebär att ett minimi- och maximivärde anges till varje parameter och att det verkliga svaret existerar någonstans inom detta intervall. Detta är en metod som är lämplig att använda när det ej finns empiriska underlag som möjliggör en beskrivning av indataparametrar som fördelningar (Öberg, 2009: 197).

2.5.2.3 Sannolikhetsfördelningar på parametrar

Finns tillräckligt underlag eller annan data kan osäkerheter i indataparametrar beskrivas med hjälp av sannolikhetsfördelningar. En intervallanalys kan beskrivas som en likformig sannolikhetsfördelning, men utan någon information om sannolikheten för respektive värde inom intervallet. Andra sannolikhetsfördelningar är exempelvis normalfördelning och triangelfördelning. I en normalfördelning antar variabeln sällan sådana värden som avviker kraftigt från medelvärdet (beroende på storleken hos standardavvikelsen). En triangelfördelning fungerar på ett liknande sätt, men beskrivs med en undre gräns, övre gräns och medianvärde, vilket resulterar i en spetsigare fördelning.

2.5.2.4 Känslighetsanalys

När det i riskutredningar förekommer osäkerheter kring indata är känslighetsanalys ett vanligt sätt att hantera dessa osäkerheter. Ett syfte med att utföra en känslighetsanalys är att ta reda på vilken indataparameter som påverkar utdata mest. Genom att utföra en sådan analys går det att utröna vilken eller vilka parametrar som bör studeras mer i detalj för att minska osäkerheten i utdata. Exempelvis går det att undersöka om trycket i en tank eller ett håls storlek har störst inverkan på konsekvensavståndet.

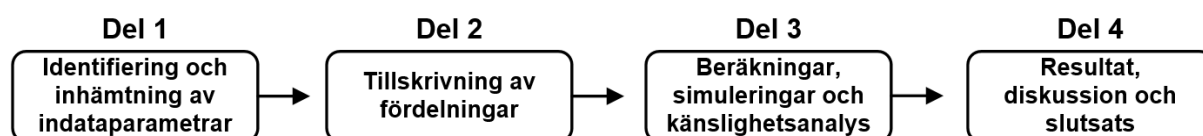
Ett tillvägagångssätt för känslighetsanalys är en så kallad one-way känslighetsanalys (Rausand, 2013: 512). En förutsättning för detta tillvägagångssätt är att parametern skattas som ett intervall. Ett medelvärde för samtliga parametrar kommer att generera ett medelvärde för utdata om dessa sätts in i en modell. Efter att detta medelvärde erhållits kan en indataparameter i taget undersökas genom att variera denna medan samtliga andra indataparametrar hålls konstanta. Därefter jämförs hur mycket utdata påverkas av förändringarna av respektive parameter. På detta vis går det att avgöra vilken parameter som är viktigast för resultatet och därmed också vilken som borde undersökas närmare för att minska osäkerheten i utdata.

Det är möjligt att utföra osäkerhetsanalyser genom att fortplanta osäkerheter genom att utföra så kallade Monte Carlo-simuleringar. Vid användning av denna metod ingår osäkra indataparametrar som sannolikhetsfördelningar (Palisade Corporation, 2016: 29). När dessa simuleringar utförts kan en känslighetsanalys genomföras.

En metod för att utföra känslighetsanalyser är Spearmans rangkorrelation, vilket är tillvägagångssättet som kommer att användas i detta examensarbete. Med denna analys beräknas Spearmans rangkorrelationskoefficient, ρ , mellan utdata och varje ingående fördelning. Spearmans rangkorrelation mäter korrelationer mellan variabler och visar styrkan av dessa samt om variablerna korrelerar positivt eller negativt. Utifrån variablernas korrelation skapas rangkorrelationskoefficienten för respektive variabel och antar ett värde mellan -1 och 1 beroende på styrkan och riktningen hos denna korrelation. Ju högre korrelation mellan indata och utdata, desto mer signifikant är indataparametern när det kommer till att avgöra utdatans värde (Palisade Corporation, 2016: 64). Programmet @RISK kommer att användas i detta examensarbete och kan ta fram Spearmans rangkorrelation.

3 Metod

Jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) kommer inledningsvis att bidra med det dataunderlag som senare används för kvantifiering av konsekvensavstånd och sedermera risknivåer på olika avstånd från den fiktiva vägsträckan. Dessa data kommer därefter att användas för att genomföra beräkningar för kvantifiering av resultaten och senare känslighetsanalys för att utröna vilka indataparametrar som har störst inverkan på resultatet. Examensarbetets slutskede kommer att bestå av att försöka formulera förbättringar baserat på de slutsatser som dras för att bidra till att höja kvaliteten på riskutredningar. En övergripande metodbeskrivning presenteras i Figur 7 nedan.



Figur 7. Metodöversikt.

En mer ingående beskrivning av metodens delsteg återges i nästkommande avsnitt.

3.1 Identifiering och inhämtning av indataparametrar

Detta examensarbete tar sin utgångspunkt i jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016). De slutkonsekvenser, indataparametrar och övrig information som presenteras i jämförelsestudien kommer att utgöra grunden av kvantifieringen som utförs i detta examensarbete. De resultat som författarna av denna jämförelsestudie kom fram till ligger således till grund för detta examensarbete. Det första steget i föreliggande examensarbete är därför att identifiera indataparametrar i de riskutredningar som kartlades för att sedan kunna kvantifiera vilken effekt osäkerheter har på resultatet.

Kvantifieringen av konsekvensavstånd kommer att baseras på de beräkningsmodeller som presenteras i *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor* av Försvarets forskningsanstalt (Fischer et al., 1998). I denna litteratur finns flertalet ekvationer för beräkning av konsekvenser vid olyckor som härrör från transport av farligt gods. De indataparametrar som eftersöks för att kunna kvantifiera riskavstånden baseras på de variabler som ingår i de beräkningsmodeller som presenteras av Fischer et al. (1998).

För somliga indataparametrar återgavs endast en punktskattning i jämförelsestudien. Således kunde dessa indataparametrar inte tilldelas fördelningar baserat på data från jämförelsestudien. Vissa indataparametrar som används i Fischer et al. (1998) saknades helt i jämförelsestudien. För de indataparametrar som underlaget var bristfälligt för ansattes därför antingen punktskattningar eller fördelningar baserat på jämförelsestudien, kurslitteratur, andra källor och resonemang.

Indataparametrarna från jämförelsestudiens resultat överfördes till datablad i Microsoft Excel för vidare behandling med hjälp av @RISK. En närmare beskrivning av tillvägagångssättet för simulering och känslighetsanalys görs i avsnitt 3.3 nedan.

3.2 Tillskrivning av fördelningar

Alvarsson & Jansson (2016) kartlade och sammanfattade olika riskutredningar med geografisk spridning i Sverige, upprättade av flera olika konsultbolag. I samband med att simuleringarna utfördes tillskrevs fördelningar för de indataparametrar som framtagits från resultaten i jämförelsestudien. Syftet med att utföra simuleringarna är att få en överblick av den osäkerhet som förekommer och vad den har för effekt på konsekvensavstånd och sedermera individ- och samhällsrisk. Detta görs för att kunna kvantifiera risknivåerna på olika avstånd från den fiktiva vägsträckan. Den typ av fördelning som användes vid simuleringarna var en PERT-fördelning, vilket beskrivs mer ingående senare i detta avsnitt.

Somliga indataparametrar tenderar att vara tämligen plats specifika för den enskilda riskutredningen. En plats specifik parameter skulle exempelvis kunna vara andel av respektive ämnesklass som transporteras medan en icke plats specifik parameter skulle kunna vara källstyrka vid ett utsläpp. Genom att ta hänsyn till flera riskutredningar ökar möjligheten att fånga upp både den epistemiska och aleatoriska osäkerhet som förekommer i indatarummet. Plats specifika variabler inrymmer en stor del aleatorisk osäkerhet, vilket är det som huvudsakligen bör ha en inverkan på resultatet av en riskutredning. Den aleatoriska osäkerheten är därför inte den del av osäkerheten som kan eller bör minskas för att erhålla mer verklighetstroga resultat. Plats specifika variabler kan däremot även innehålla epistemisk osäkerhet om det är svårt att mäta eller uppskatta den för en viss plats. Denna del av osäkerheten är mest önskvärd att reducera. Distinktionen mellan aleatorisk och epistemisk osäkerhet i detta examensarbete kommer därför att ge en fingervisning om vilken eller vilka indataparametrar som bör undersökas i närmare detalj för att få bättre underlag till framtida riskutredningar.

Efter att indataparametrarna sammanställts analyserades dessa genom simuleringar av konsekvensavstånd, individrisk och samhällsrisk. Ett av målen med detta examensarbete är att kvantifiera effekten av de antaganden som görs i beräkningarna av individ- och samhällsrisk. Detta kan eventuellt bidra till en ökad medvetenhet om vilka parametrar som bör undersökas närmare i framtiden. Därför beräknas individrisken på ett antal olika avstånd. De avstånd som valdes att undersökas baseras på konsekvensavstånden som togs fram med hjälp av handberäkningar utifrån beräkningsmodeller från Försvarets forskningsanstalt (Fischer et al., 1998). För att genomföra simuleringarna användes @RISK.

Indata från jämförelsestudien bearbetades och utifrån dessa data skapades sannolikhetsfördelningar. Innan detta arbete påbörjades bestämdes vilken typ av fördelning som skulle användas. Riskutredningar genomsyras av subjektiva värderingar (Slettenmark 2003: 61), vilket gör att många delar av dem kan betraktas som expertbedömningar. Indatarummet består således till stor del av expertutlåtanden med en del indataparametrar som bygger på statistik som är av generell karaktär. Samtliga delar av en riskutredning utgörs emellertid inte av expertbedömningar (exempelvis trafikflöden). Detta medför att användning av PERT-fördelningen är mer lämplig i vissa fall och mindre i andra. Expertutlåtanden kan på ett mer tillförlitligt sätt modelleras med icke-parametriska sannolikhetsfördelningar än parametriska sannolikhetsfördelningar (Vose, 2008: 402). På grund av detta är fördelningar som normal-, Weibull-, Pareto- och lognormalfördelningar mindre passande för detta syfte än exempelvis likformiga fördelningar eller triangelfördelningar (Vose, 2008: 402).

En triangelfördelning introducerar förutom lägsta och högsta värde även ett värde mellan dessa som är mest vanligt förekommande (Vose, 2008: 403). Resultatet blir en triangelform, varifrån triangelfördelningen fått sitt namn. Utifrån de data som erhålls i Alvarsson & Jansson (2016) är det nästan uteslutande värden i indatarummen som är mer vanligt förekommande än andra, vilket gör det ofördelaktigt att använda likformiga fördelningar eftersom detta inte på ett korrekt sätt representerar indatarummet. Triangelfördelningen förefaller därför som en mer representativ fördelning till de data som kommer från jämförelsestudien i förhållande till en likformig fördelning.

Det finns svagheter med triangelfördelningen som gör att denna inte är mest passande för ändamålet. Denna fördelning lägger lika stor vikt vid de värden som bestämmer dess form; det lägsta, mest vanligt förekommande och högsta värdet. Om det lägsta eller högsta värdet i triangelfördelningen skiljer sig markant från de andra värdena i indatarummet blir medelvärdet i fördelningen missvisande (Vose, 2008: 406). Detta sker exempelvis om det i observerad indata innehåller ett ytterlighetsfall som stämmer för ett specifikt scenario, men som inte är representativt i ett helhetsperspektiv.

För att skapa en modell som mer lämpligt motsvarade indata från jämförelsestudien användes en PERT-fördelning. Detta är en speciell form av betafördelning som utgör en sannolikhetskurva som traditionellt associeras med PERT (Program Evaluation and Review Technique), vilket är en metod inom projektledning (Golenko-Ginzburg, 1988; Palisade Corporation, 2016: 658). Denna sannolikhetsfördelning används i stor utsträckning inom riskanalys och är passande att använda om indatarummet består av expertutlåtanden (Vose, 2008: 402). Denna fördelning är inte lika känslig för ytterlighetsfall som triangelfördelningen är. Genom att använda denna fördelning kan således hela indatarummet representeras utan att medelvärdet blir missvisande. På detta sätt går det att undvika de potentiella systematiska fel som en triangelfördelning kan leda till (Vose, 2008: 406).

Väntevärdet för PERT-fördelningen bygger på samma antagande som görs inom PERT, det vill säga att mest vikt läggs vid det vanligast förekommande värden i indatarummet (Clark, 1962). Detta illustreras med hjälp av Ekvation 4 nedan.

$$E[X] = \mu = \frac{a + 4b + c}{6} \quad \text{Ekvation 4}$$

I ovanstående ekvation är a minsta värdet, b typvärdet och c största värdet. Medelvärdet för fördelningen är därför definierad som det viktade medelvärdet av det minsta värdet, typvärdet och det största värdet, där typvärdet har fyra gånger så stor inverkan.

Det går att argumentera för att en triangelfördelning kompenserar för överkonfidens eller överdriven tilltro till det indata som undersöks genom att inte lägga tonvikt på typvärdet som PERT-fördelningen gör. Emellertid går det att argumentera för att expertutlåtanden bör modelleras så exakt som möjligt, bland annat för att det då blir lättare att på sikt påvisa att uppskattningarna borde korrigeras (Vose, 2008, 406).

3.3 Beräkningar, simuleringar och känslighetsanalys

Vid simuleringarna används urvalsmetoden *Latin hypercube sampling* (LHS) i stället för den sedvanliga Monte Carlo-metoden (MCM). Fördelen med LHS är att den gör ett stratifierat urval från indatarummet medan MCM gör slumpmässiga urval från indatarummet (Palisade Corporation, 2016: 232). LHS återskapar sannolikhetsfördelningarna som anges av fördelningsfunktionerna med färre iterationer i jämförelse med MCM. Eftersom färre iterationer kan väljas går således simuleringarna fortare genom att använda LHS (Palisade Corporation, 2016: 819-820). För samtliga simuleringar valdes 5 000 iterationer.

Efter att simuleringarna genomförts så utförs en känslighetsanalys av de resultat som framtoqs i de simuleringar som tidigare gjorts. En känslighetsanalys innebär att den totala osäkerheten i utfallet av en matematisk modell undersöks och fördelas på olika källor till osäkerheter i dess indataparametrar (Saltelli, 2002). Detta gjordes för att ta reda på vilka parametrar som har störst inverkan på den totala riskbilden. Programvaran @RISK användes för att få genomföra en känslighetsanalys. Denna känslighetsanalys avgjorde vilka parametrar som valdes ut för närmare undersökning.

3.4 Resultat, diskussion och slutsats

I denna del av examensarbetet presenteras resultatet. Detta följs av en diskussion av val av metod, metodens olika delsteg samt de resultat som erhållits. I detta steg belyses även vanliga antaganden och deras effekt på riskbilden. De problem som uppdagades under arbetets gång diskuteras och utvärderas. Även osäkerheter, felkällor, begränsningar och avgränsningar i föreliggande examensarbete diskuteras.

I det avslutande skedet av examensarbetet besvaras frågeställningarna. Här presenteras även förslag på framtida undersökningar som kan göras för att behandla osäkerheter i riskutredningar. Målsättningen är att detta leder till mer välgrundade beslut när det gäller riskhantering vid fysisk planering.

4 Identifiering av indataparametrar i jämförelsestudie

I detta avsnitt redogörs tillvägagångssättet vid identifiering och sammanställning av indataparametrar från jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) som presenterats i avsnitt 3.1 i metoden. Relevant information för varje eftersökt indataparameter sammanställdes i ett Excel-dokument och behandlades med @RISK. Detta genererade tabeller med upp till 14 olika värden för varje parameter (ett värde från varje riskutredning). Sedermera togs nyckeltal såsom minimi-, median-, och maximivärde fram. Dessa värden användes sedan för att skapa PERT-fördelningar.

Vilka slutkonsekvenser som beaktas i detta examensarbete styrs av vilka slutkonsekvenser som beaktas i jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016). De slutkonsekvenser som identifierades i jämförelsestudien redovisas i Tabell 4 nedan.

Tabell 4. Identifierade slutkonsekvenser för respektive ämnesklass samt hur många riskutredningar som behandlat respektive slutkonsekvens (Alvarsson & Jansson, 2016: 28).

Ämnesklass	Slutkonsekvens	Antal riskutredningar
1	Explosion	13
2.1	BLEVE, jetflamma, gasmolnsexplosion	14
2.2	-	-
2.3	Giftigt gasmoln	13
3	Pölbrand	14
	Fordonsbrand	4
	Giftigt gasmoln	2
4.1	Brand	1
4.2		
4.3		
5.1	Explosion	11
	Brand	6
5.2	-	-
6	Giftigt gasmoln	2
	Stänk	1
7	-	-
8	Stänk	3
9	-	-

Avsaknaden av identifierad slutkonsekvens för somliga ämnesklasser begränsar vilka ämnesklasser som kan behandlas vidare i detta examensarbete. Därmed är ämnesklasserna 2.2, 5.2, 7 och 9 samt deras tillhörande indataparametrar inte längre möjliga att undersöka utifrån jämförelsestudien och således beaktas dessa ej i detta examensarbete. Dessutom behandlas inte samtliga av de identifierade slutkonsekvenserna vidare i jämförelsestudien, vilket ytterligare begränsar vilka ämnesklasser som kan beaktas i detta examensarbete. Vilka indataparametrar som är av intresse begränsas även av vilka variabler som ingår i de beräkningsmodeller som används i Fischer et al. (1998). Avgränsningar gällande ämnesklasser och slutkonsekvenser specificeras ytterligare i

avsnitt 4.1.1 nedan. Explosion (ämnesklass 1) beaktas ofta i riskutredningar på grund av dess stora påverkansområde. Emellertid är underlaget som används i detta examensarbete bristfälligt för att kunna kvantifiera denna slutkonsekvens. Det är teoretiskt möjligt att kvantifiera effekten av denna slutkonsekvens, men det hamnar utanför ramen för detta examensarbete med avseende på resurser och metodval. Trots att slutkonsekvensen för ämnesklass 1 ej beaktas i detta examensarbete kommer data kopplade till denna att presenteras. Även om information om denna ämnesklass ej används i några beräkningar kan en redogörelse av denna information förmedla hur stora osäkerheter som finns inom denna parameter.

På grund av att vissa slutkonsekvenser och ämnesklasser bortses från kommer inte hela riskbilden att behandlas i detta examensarbete. Alvarsson & Jansson (2016: 29) konstaterar att val av ämnesklass motiveras utifrån potentiella konsekvenser och den mängd som transporteras. Exempelvis behandlas sällan ämnesklass 7 som utgörs av radioaktiva ämnen i riskutredningar eftersom denna ej anses ge upphov till akuta skador och därför faller inte denna inom ramen för vad riskutredningen undersöker. Detta innebär dock inte att denna ämnesklass ej utgör någon risk.

Som nämnts i avsnitt 1.1 konstaterade Tugnoli et al. (2013: 626-627) att vilka slutkonsekvenser som identifieras i hög grad påverkar en riskutrednings beräkningsdel och slutsats. Detta exemplifieras genom att riskutredningarna i jämförelsestudien endast i begränsad utsträckning inkluderar ämnesklasser och därmed slutkonsekvenser.

Vilka parametrar som eftersöks i detta examensarbete baseras på de slutkonsekvenser som identifierades i jämförelsestudien i Tabell 4 ovan. I nedanstående avsnitt presenteras dessa parametrar samt resonemang kring aleatoriska och epistemiska osäkerheter kopplade till dessa. Slutligen presenteras en sammanställning av hur parametrarna behandlas i examensarbetet.

4.1 Indataparametrar

Med utgångspunkt i de beräkningsmodeller som presenteras i Fischer et al. (1998) skapades listan nedan och tabellerna i *Bilaga A – Kodning av riskbedömningar* från jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) genomsöktes. Övriga indataparametrar som krävs för att kunna beräkna individrisk och förväntat antal döda ingår även i listan.

1. Fördelning av ämnesklasser
2. Mängder som transporteras av respektive ämnesklass
3. Frekvens för olycka med farligt gods
4. Ansatt sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass
5. Topografi och väderförhållanden (stabilitetsklass, vindstyrka, utomhustemperatur, atmosfärstryck)
6. Befolkningstäthet och andel av befolkningen som befinner sig inomhus respektive utomhus
7. Representativt ämne
8. Skadekriterier

9. Tryck och temperatur i tank
10. Källstyrka
11. Spridningsvinkel
12. Poissons kvot och kontraktionsfaktor
13. Nedre brännbarhetsgräns

4.1.1 Fördelning av ämnesklasser

Denna parameter är rimligtvis platsspecifik. Om den aktuella vägsträckan är placerad i anslutning till en farlig verksamhet kommer sannolikt fördelningen av ämnesklasser som transporteras på vägen att spegla vilken typ av ämnen som denna verksamhet använder. Emellertid framgår det i jämförelsestudien att somliga riskutredningar fastställer denna parameter med hänvisning till nationell statistik och således är denna parameter i dessa fall inte baserat på platsspecifik data. Även i de fall då olika riskutredningar hänvisar till nationell statistik förekommer variation i denna parameter. Detta förklaras med att nationell statistik kan erhållas från olika källor samt vara upprättad vid olika tillfällen (Alvarsson & Jansson, 2016: 32). För att koppla detta till aleatorisk respektive epistemisk osäkerhet kan det nämnas att fördelningen av ämnesklasser skiljer sig från plats till plats (naturlig variation) men det kan även vara okänt hur fördelningen ser ut i detalj (kunskapsosäkerhet) på grund av bristfällig data eller ofullständiga och förlegade mätningar.

De indata som hämtades från jämförelsestudien kring andelar för respektive ämnesklass presenteras i Tabell 5 nedan.

Tabell 5. De andelar av respektive ämnesklass som presenterades i jämförelsestudien.

Konsultbolag	Ämnesklass (%)									
	1	2.1	2.3	3	4	5	6	7	8	9
1A	1,1	18,5	1	62,9	-	3,23	-	-	-	-
2	0,76	4,17	0	20,7	0,3	0,5	0,54	-	29,7	-
3	0,9	0,95	0,265	76,9	-	0	-	-	-	-
4	0,04	3	0,13	43,5	-	3	-	-	-	-
5	1,5	3,18	0,053	21	-	1,5	-	-	-	-
1B	1,09	11,9	0,08	72,7	-	3,48	-	-	-	-
6	0,1	2,8	0,04	51	-	0,76	-	-	-	-
7	0,01	4,9	0,03	54	-	1,22	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0,02	1,76	0,01	69,2	-	3,52	-	-	-	-
1C	1,09	11,9	0,08	72,7	-	3,48	-	-	-	-
10	0,8	1,25	6,75	35,3	-	1,1	0,5	0	24,6	-
11	0	2,48	2,48	63,5	-	-	8	-	21	-
12	0,9	6	6	76,9	-	1,2	-	-	-	-

Det var endast en riskutredning i jämförelsestudien som specificerade hur stor andel ämnesklass 4 utgjorde. Denna riskutredning ansatte andelen av ämnesklass 4 till 0,30 %. Detta medför att ingen fördelning kunde skapas för denna ämnesklass. I stället ansåts detta värde till 0,30 % och används i kommande beräkningar. Således fångas ingen variation in från jämförelsestudien för denna ämnesklass.

Tre riskutredningar i jämförelsestudien specificerade hur stor andel ämnesklass 6 utgjorde. Återigen aggregerades delklasserna 6.1 (giftiga ämnen) och 6.2 (smittförande ämnen) till huvudklassen ämnesklass 6. De tre riskutredningar som angav ett värde ansatte andelarna till 0,54 %, 0,5 % respektive, 8 %. Uppskattningsvis är denna stora variation följden av platsspecifika skillnader. Därutöver kan nationell respektive platsspecifik statistik variera kraftigt. Även nationell statistik kan skilja sig åt beroende på vilken källa som används samt vilket år statistiken avser.

Det är vanligt förekommande att somliga ämnesklasser bortses från i riskutredningarna, vilket åskådliggörs i Tabell 5 ovan. Det finns olika anledningar till detta. Enligt Alvarsson & Jansson (2016: 26) motiveras urvalet av ämnesklasser med deras respektive potentiella slutkonsekvenser. Endast i två riskutredningar motiveras explicit det faktum att en eller flera ämnesklasser bortses ifrån med att andelen är liten. Alvarsson & Jansson (2016: 70) menar även att valet av vilka ämnesklasser som beaktas till stor del beror på olika åsikter hos de som upprättar riskutredningarna.

4.1.2 Mängder som transporteras av respektive ämnesklass

Endast för ämnesklass 1, 2.1 och 2.3 presenteras transporterade mängder i tillräckligt detaljerad utsträckning. Även för denna parameter görs ofta en storleksuppdelning i "liten", "mellan" och "stor". Därutöver har respektive uppdelning tillskrivits en sannolikhet. För ämnesklass 3 så anges inte mängden som transporteras. I stället anges olika pölstorlekar i kvadratmeter givet att olycka och läckage sker. Motsvarande information för övriga ämnesklasser förekommer i jämförelsestudien och dessa redogörs för i avsnitt 5.

4.1.3 Frekvens för olycka med farligt gods

Parametern *frekvens för olycka med farligt gods* är egentligen inte en indataparameter utan beräknas med hjälp av ett antal indataparametrar. Exempelvis kan den så kallade VTI-modellen nyttjas för att beräkna denna frekvens. I jämförelsestudien presenteras endast den framräknade frekvensen, vilket omöjliggör en ytterligare uppdelning i de indataparametrar som denna modell använder sig av. Därutöver har en djupare undersökning av VTI-modellen genomförts i ett tidigare examensarbete av Ardin & Markselius (2016) och därmed behandlas detta som en indataparameter i detta examensarbete.

Denna parameter bedöms vara platsspecifik på grund av den aktuella vägens skick och utformning, hastighetsbegränsning, trafikering etc. 11 riskutredningar uppger att de använder VTI-modellen för att uppskatta frekvens för olycka med farligt gods. Denna modell tar hänsyn till andel tunga fordon för farligt gods samt totala antalet trafikolyckor på aktuell vägsträcka (VTI, 1994). Även stor epistemisk osäkerhet kan dock råda om kunskap om trafikering vid en viss väg är bristfällig.

11 riskutredningar anger information kring frekvens för olycka med farligt gods. Detta underlag är tillräckligt för att skapa en fördelning och kan behandlas enligt planerat förfarande. Erhållen data från jämförelsestudien presenteras i Tabell 6 nedan. Konsultbolag 1A, 1B och 1C indikerar att det rör sig om samma företag, men att utredningarna är upprättade på olika orter i Sverige.

Tabell 6. Information kring indataparametrarna frekvens för olycka med farligt gods från jämförelsestudien.

Konsultbolag	Frekvens för olycka med farligt gods (år ⁻¹)
1A	$2,50 \cdot 10^{-5}$
2	-
3	$2,04 \cdot 10^{-5}$
4	-
5	$1,79 \cdot 10^{-4}$
1B	$1,75 \cdot 10^{-4}$
6	$6,75 \cdot 10^{-5}$
7	$3,30 \cdot 10^{-5}$
8	-
9	$1,89 \cdot 10^{-4}$
1C	$3,10 \cdot 10^{-5}$
10	$2,55 \cdot 10^{-6}$
11	$4,09 \cdot 10^{-8}$
12	$2,96 \cdot 10^{-5}$

4.1.4 Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass

Denna parameter är rimligtvis inte platsspecifik. Till exempel är sannolikheten att en BLEVE inträffar givet att en olycka sker oberoende av geografisk plats. Generellt redovisas sannolikheter för respektive slutkonsekvens väl. De riskutredningar som delat upp slutkonsekvenser i olika storlekar har också angivit en sannolikhet för respektive storlek. Dock uppstår problematik när dessa data ska aggregeras. Detta behandlas i avsnitt 5 nedan.

4.1.5 Topografi och väderförhållanden

Sex riskutredningar angav vilken topografi som ansattes för de slutkonsekvenser där topografi är relevant. Fem av dessa angav tät skog / stad som topografi medan den sjätte angav flack topografi. Baserat på detta kommer beräkningarna i detta examensarbete baseras på tät skog / stad som topografi, trots att denna parameter är platsspecifik.

Väderförhållande är en platsspecifik parameter, men baserat på jämförelsestudien är variationen som förekommer begränsad inom Sverige. Stabilitetsklassen definieras delvis av vilken solhöjd (i grader) som råder. Detta gör exempelvis att stabilitetsklass A är sällsynt i Sverige på grund av landets nordliga placering på jorden (Fischer et al., 1998: 184). Troligtvis förekommer dock kunskapsosäkerhet utöver den naturliga variation som också förekommer. Exempelvis kan data erhållas från väderstationer som inte ligger på exakt den plats riskutredningen avser.

Sju riskutredningar i jämförelsestudien angav vilken eller vilka stabilitetsklasser som undersöktes för de slutkonsekvenser då stabilitetsklass är relevant. Tio riskutredningar angav vilken eller vilka vindhastigheter som undersöktes. I Tabell 7 nedan återges den information kring dessa parametrar som erhöles från jämförelsestudien. Baserat på denna information kunde en fördelning skapas för vindhastighet och vilka stabilitetsklasser som oftast ansåts kunde avgöras.

Tabell 7. Information kring stabilitetsklass och vindhastighet erhållen från jämförelsestudien.

Konsultbolag	Stabilitetsklass	Vindhastighet (m/s)
1A	B	2 och 6
2	-	-
3	D och F	1, 3, 5 och 7
4	-	-
5	-	3
1B	B	2 och 6
6	B	2 och 6
7	A, D och E	2 och 6
8	-	2 och 6
9	-	3
1C	B	2 och 6
10	-	-
11	-	-
12	A, B, C, D, E och F	2 och 6

Endast åtta riskutredningar angav en utomhustemperatur. Samtliga av dessa var punktskattningar, två av dessa ansatte 5 °C medan resterande ansatte 15 °C. Det bedömdes som rimligt att utomhustemperaturen också kan anta värdet 25 °C. På grund av detta lades även denna temperatur till som underlag till beräkningarna. Utöver att parametern är platsspecifik varierar den även över tid.

Underlaget gällande atmosfärstryck i jämförelsestudien är bristfälligt. För att lösa detta erhöles data från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI).

4.1.6 Befolkningstäthet och andel av befolkningen inomhus respektive utomhus

Parametern befolkningstäthet är platsspecifik och kommer således att vara behäftad med stor aleatorisk osäkerhet på grund av att det bor varierande antal människor på olika platser. Parametern varierar även över tid (dygn och år) på en viss plats. Det är rimligt att anta att denna parameter även kommer att vara behäftad med epistemisk osäkerhet. Exempelvis görs uppskattningar i jämförelsestudien kring olika befolkningstätheter på olika avstånd. I somliga fall baseras befolkningstätheten på verksamheter i området och i något fall görs ett konservativt antagande. Sannolikt kommer dessa olika tillvägagångssätt att kräva antaganden som följd av kunskapsosäkerhet.

Två riskutredningar ansätter olika befolkningstätheter på olika avstånd från transportleden. En riskutredning ansätter olika befolkningstätheter för dag respektive natt medan övriga riskutredningar endast presenterar ett värde för befolkningstätheten utan att specificera avstånd eller tidpunkt på dygnet. Detaljerna för denna parameter återges i Tabell 8 nedan.

Tabell 8. Detaljerad information över vilka värden som konsultbolagen har ansatt för befolkningstäthet i jämförelsestudien.

Konsultbolag	Befolkningstäthet (personer/km ²)					
	Ospecificerat	<30 m	<40 m	>40 m	Dag	Natt
1A	1285	-	-	-	-	-
2	2500	-	-	-	-	-
3	-	1000	-	-	-	-
4	-	-	-	-	1285	950
5	4200	-	-	-	-	-
1B	-	0	8900	3600	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
1C	3600	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	4000	-	-	-	-	-
12	3100	-	-	-	-	-

Andel av befolkningen inomhus respektive utomhus är en parameter som är platsspecifik på så vis att den är relaterad till vilken typ av bebyggelse som finns i området. Om ett område i stor utsträckning består av arbetsplatser i form av kontor kommer andel av befolkning som befinner sig inomhus vid en viss tidpunkt att vara annorlunda än ifall området i stället hade bestått av bebyggelse i form av bostadshus. Uppskattningsvis förekommer stor naturlig variation över tid, dels över dygnet och dels över året. Vidare bedöms även kunskapsosäkerheten vara stor på grund av grova antaganden och oklara mätmetoder.

13 riskutredningar i jämförelsestudien angav ett värde för hur många människor som befinner sig inomhus respektive utomhus. Två riskutredningar gjorde även en distinktion för andel människor inomhus / utomhus beroende på om det är dag eller natt. I Tabell 9 nedan återges den data som erhöles från jämförelsestudien kring denna parameter.

Tabell 9. Information kring ansatt andel av människor som befinner sig inomhus respektive utomhus.

Konsultbolag	Andel utomhus (%)
1A	100
2	100
3	100
4	1 (natt) 7 (dag)
5	10-15
1B	1 (natt) 10 (dag)
6	6,2
7	100
8	-
9	100
1C	100
10	100
11	20
12	20

4.1.7 Representativt ämne

Vid konsekvensberäkningar används ofta kemiska och fysikaliska egenskaper hos ämnen. Därmed är det viktigt att explicit nämna vilket ämne beräkningarna är baserade på. Olika kemikalier har olika egenskaper, bland annat i form av toxicitet. I teorin borde varje enskilt ämne som transporteras behandlas explicit i syfte att verklighetsförankra riskutredningar i största möjliga mån. I praktiken är detta emellertid inte implementerbart på grund av det stora antalet olika ämnen som transporteras.

Vid transport av farligt gods transporteras många olika kemiska substanser. Därför är det lämpligt att genomföra beräkningar för olika ämnen. Denna parameter är därmed behäftad med både aleatorisk och epistemisk osäkerhet.

4.1.8 Skadekriterier

Baserat på de slutkonsekvenser som beaktas i detta examensarbete är de skadekriterier som är relevanta att specificera koncentration (giftig gas) och värmestrålning (BLEVE och jetflamma). Dessa parametrar är ej platsspecifika. Det förekommer naturlig variation inom populationen på så sätt att olika individer kan ha olika grader av känslighet gentemot koncentrationer av ett visst ämne eller omfattningar av värmestrålning. Även stor epistemisk osäkerhet föreligger gällande skadekriterier för koncentrationer och värmestrålning till följd av att data saknas.

För skadekriterier gällande koncentrationer kan den aleatoriska osäkerheten hanteras med mått som LC_{50} (lethal concentration, 50 %). Måttet LC_{50} representerar den koncentration vid vilken 50 % av populationen omkommer vid en given exponeringstid. I jämförelsestudien anges emellertid inte exponeringstid för de LC_{50} -värden som förekommer. På grund av detta är värdena som anges i jämförelsestudien ej jämförbara, vilket innebär att dessa värden inte kan användas i detta examensarbete. I stället används skadekriterier som anges i MSB RIB för respektive representativt ämne. Där anges vid vilken koncentration som risk för dödsfall föreligger givet en viss exponeringstid.

I de riskutredningar som behandlas i jämförelsestudien framgår det inte tydligt vid vilken värmestrålning och tidsexponering som samtliga exponerade personer antas omkomma.

4.1.9 Tryck och temperatur i tank

Sju riskutredningar angav värden för tryck i tank. Fyra av dessa anger att detta tryck är 5 bar, medan resterande riskutredningar anger 7 bar. Denna variation kan förklaras med att olika ämnen transporteras under olika tryck. Tre riskutredningar angav temperaturen i tank, vilket i samtliga fall var 288 K. Transport av gaser är reglerat enligt ADR och därför bedöms trycket inte vara en platsspecifik parameter inom Sverige. Temperaturen och trycket i tank bedöms korrelera med utomhustemperaturen och är således indirekt platsspecifik.

4.1.10 Källstyrka

Källstyrka kan beräknas med hjälp av ett antal olika parametrar och är på det viset inte en indataparameter. Däremot utgör källstyrka en indataparameter i de modeller för beräkning av konsekvensavstånd som presenteras av Fischer et al. (1998). Vidare redovisas ansatt

källstyrka väl i jämförelsestudien med hög detaljeringsgrad. Baserat på detta behandlas källstyrka i detta examensarbete som en indataparameter i de fall då det inte går att beräkna källstyrkan utifrån andra data.

Denna parameter är inte platsspecifik. Källstyrka beror huvudsakligen på hålstorlek och tanktryck. Dessa faktorer varierar rimligtvis inte med geografisk plats. Den storleksuppdelning som har gjorts i majoriteten av riskutredningarna är troligtvis ett försök att hantera den aleatoriska osäkerheten genom att täcka en del av den naturliga variation som kan förekomma. De sannolikheter som respektive källstyrkestorlek har tillskrivits är uppskattningsvis behäftad med stor epistemisk osäkerhet.

För de ämnesklasser där det är relevant, 2.1 och 2.3, har det i fem av riskutredningarna presenterats detaljerad information för denna parameter. Återigen har det gjorts en storleksuppdelning. Därutöver har en sannolikhet för respektive storlek ansatts. I Tabell 10 och i Tabell 11 nedan återges de indata som erhöles från jämförelsestudien.

Tabell 10. Data över indataparametern källstyrka för ämnesklass 2.1 från jämförelsestudien

Konsult- bolag	Källstyrka (kg/s)			Sannolikhet (%)		
	Liten	Mellan	Stor	Liten	Mellan	Stor
1A	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
2	-	-	-	-	-	-
3	0,09	0,9	17,8	62,5	20,8	16,7
4	-	-	-	-	-	-
5	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
1B	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
1C	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

Tabell 11. Data över indataparametern källstyrka för ämnesklass 2.3 från jämförelsestudien.

Konsult- bolag	Källstyrka (kg/s)			Sannolikhet (%)		
	Liten	Mellan	Stor	Liten	Mellan	Stor
1A	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
2	-	-	-	-	-	-
3	0,08	0,7	9,4	62,5	20,8	16,7
4	-	-	-	-	-	-
5	0,09	0,9	17,8	60	20	20
1B	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
6	2,4	-	60	70	-	30
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
1C	0,09	0,9	17,9	62,5	20,8	16,7
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

4.1.11 Spridningsvinkel

Denna parameter bedöms till största del bero på källstyrka vid ett utsläpp och källstyrka är enligt tidigare resonemang inte platsspecifik. Spridningsvinkeln är emellertid till viss del beroende av väderförhållande. Vid beräkning av spridningsvinkel används först en ekvation för beräkning av dispersion av gasmoln. I denna ekvation ingår vindhastighet som parameter (CCPS, 2000: 591).

I jämförelsestudien är informationen om denna parameter begränsad. Inga spridningsvinklar anges i Bilaga A från Alvarsson & Jansson (2016). Däremot presenteras en tabell i resultatet där information om spridningsvinklar återges. De slutkonsekvenser som tilldelats en spridningsvinkel återges Tabell 12 i nedan.

Tabell 12. Angivna spridningsvinklar för olika slutkonsekvenser från jämförelsestudien.

Slutkonsekvens	Spridningsvinkel
Jetflamma	15° - 68°
Gasmolnsexplosion och gasmolnsbrand	7° - 65°
Giftigt gasmoln	15° - 55°

4.1.12 Poissons kvot och kontraktionsfaktor

Kvoten mellan specifikt värme vid konstant tryck respektive konstant volym för ett visst ämne kallas för Poissons kvot, γ (Fischer et al., 1998: 65). Ingen information om värdet för Poissons kvot återfanns i jämförelsestudien. Vanligtvis varierar denna parameter mellan 1,1 och 1,6 medan värdet 1,3 i regel används som standard för utströmningsberäkningar (Fischer et al, 1998: 66). Denna parameter är inte platsspecifik utan är i stället ämnesberoende och temperaturberoende.

Kontraktionsfaktorn, C_d , varierar med hålets karaktär och beskriver hur väl en fluid kan strömma ur ett hål. För ideal utströmning antar kontraktionsfaktorn värdet 1. För hål med rundade inloppskanter antar faktorn värdet 0,95 och för skarpkantade hål 0,75 (Fischer et

al., 1998: 69). Denna parameter är inte platsspecifik. Värdets variation härleds rimligtvis till både till aleatorisk och epistemisk osäkerhet.

4.1.13 Nedre brännbarhetsgräns

Brännbarhetsområdet för en gas/luftblandning definieras av en nedre och en övre koncentration av gasen i luft. Om koncentrationen ligger utanför brännbarhetsområdet är gas/luftblandningen inte brännbar (Almgren, 2007). Nedre brännbarhetsgräns är inte en platsspecifik parameter. Däremot är den ämnesspecifik och kan påverkas av tryck, temperatur och syrekoncentration (Almgren, 2007). Ingen information om värdet för nedre brännbarhetsgräns återfanns i jämförelsestudien. Både den naturliga variationen och kunskapsosäkerheten gällande denna parameter bedöms vara liten.

4.2 Sammanställning av parametrar

I Tabell 13 nedan presenteras en sammanställning av de parametrar som har identifierats i detta kapitel utifrån jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) och beräkningsmodellerna som beskrivs i Fischer et al. (1998).

Tabell 13. Sammanställning av parametrar som identifierats i jämförelsestudien, var information om dessa parametrar återfinns och hur dessa behandlas i kommande beräkningar.

Parameter	Källa	Plats-specifik	Behandling av parameter
Fördelning av ämnesklasser	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Mängder av ämnesklasser	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Frekvens för olycka	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka	Jämförelsestudie	Nej	PERT-fördelning
Topografi	Jämförelsestudie	Ja	Punktskattning
Stabilitetsklass	Jämförelsestudie	Ja	Punktskattning
Vindhastighet	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Utomhustemperatur	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Atmosfärstryck	SMHI	Nej	PERT-fördelning
Befolkningstäthet	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Andel av befolkning inomhus respektive utomhus	Jämförelsestudie	Nej	PERT-fördelning
Representativt ämne	Jämförelsestudie	Nej	Punktskattning
Skadekriterier	MSB RIB och ALOHA	Nej	Punktskattning
Tryck i tank	Jämförelsestudie	Nej	PERT-fördelning
Temperatur i tank	Jämförelsestudie	Ja	PERT-fördelning
Källstyrka	Jämförelsestudie	Nej	PERT-fördelning
Spridningsvinkel	Jämförelsestudie	Nej	PERT-fördelning
Poissons kvot	FOA	Nej	PERT-fördelning
Kontraktionsfaktor	FOA	Nej	Likformig fördelning
Nedre brännbarhetsgräns	MSB RIB	Nej	Punktskattning

De förenklingar som gjorts gällande somliga indataparametrar kommer att påverka resultatet i kommande beräkningar. Detta diskuteras närmre i avsnitt 6.

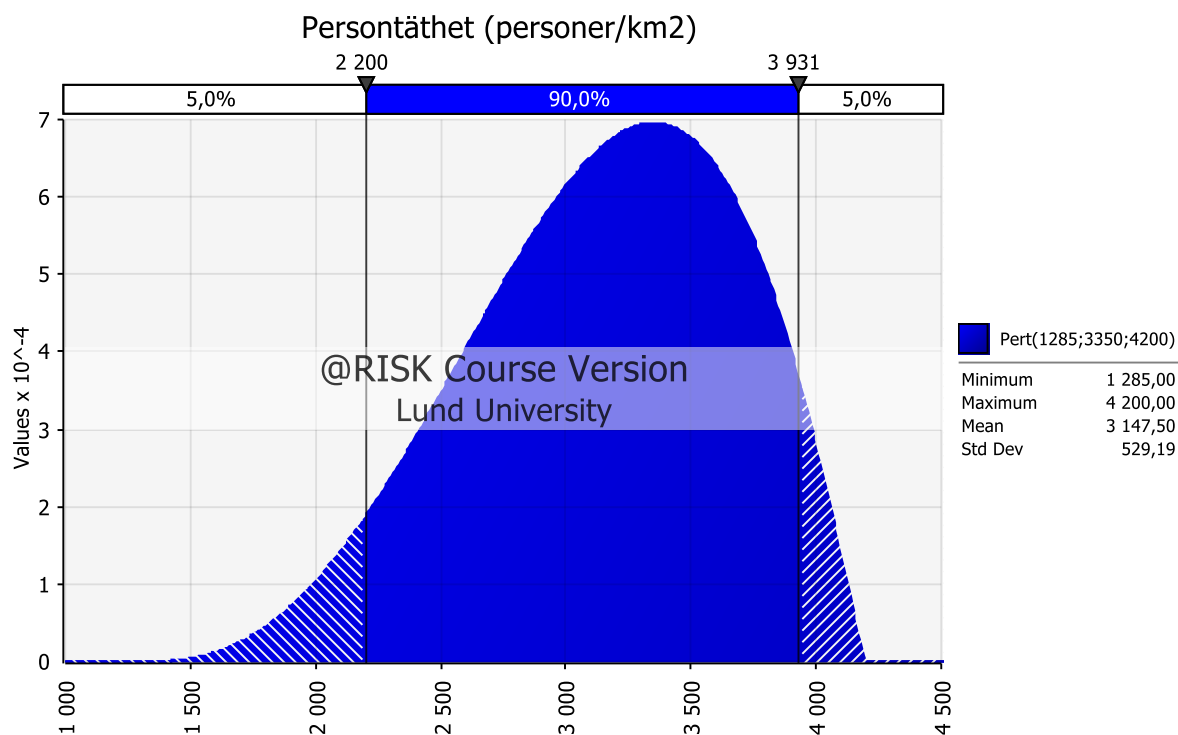
5 Resultat av beräkningsmodell

I detta avsnitt tillskrivs indataparametrar sannolikhetsfördelningar. Därefter genomförs konsekvensberäkningar för att slutligen kunna beräkna individ- och samhällsrisk. Med hjälp av sannolikhetsfördelningarna förmedlas osäkerheterna i indataparametrarna i form av konfidensintervall på de beräknade riskmåten.

I flertalet riskutredningar valdes en uppdelning av slutkonsekvenser i olika storlekar. Till exempel delades slutkonsekvensen pölbrand i de flesta riskutredningar upp i "liten", "mellan" och "stor". Problem uppstår när dessa subjektiva uppdelningar av parametrar från olika riskutredningar senare skall kombineras. Eftersom olika konsultfirmor definierar "liten", "mellan" och "stor" på olika sätt finns inga entydiga numeriska värden för dessa uppdelningar. Medianvärdet som ingår i PERT-fördelningarna beräknas därför genom att ta hänsyn till den sannolikhet som respektive riskutredning tillskrivits en viss storlek av källstyrka. Förutsatt att en riskutredning valt att dela upp en konsekvens i "liten", "mellan" och "stor" viktas därför dessa uppdelningar med sannolikheterna som tillskrivits dessa när medianvärdet beräknas.

5.1 Behandling av indataparametrar

För att tydliggöra förfarandet vid tillskrivning av fördelningar illustreras PERT-fördelningen som angivits för indataparametern persontäthet (personer/km²) i Figur 8 nedan. I detta fall var det minsta ansatta värdet 1 285, det största ansatta värdet var 4 200 och medianen var 3 350.



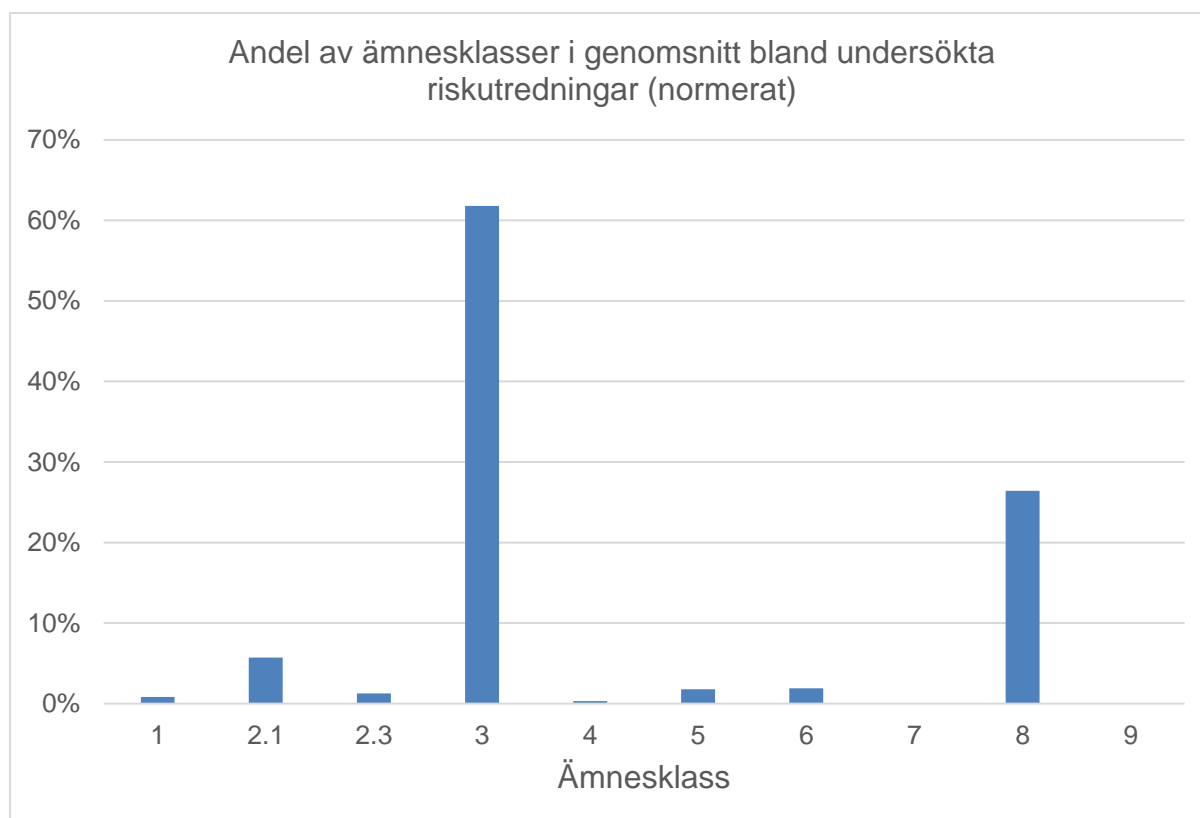
Figur 8. Den genererade PERT-fördelningen för indataparametern persontäthet (personer/km²).

Med denna PERT-fördelning blev väntevärdet 3 148 och undre och övre gränserna med 90 % konfidensintervall blev 2 200 respektive 3 931.

Det generella tillvägagångssättet för att ta fram fördelningar för indataparametrarna förmedlades i Figur 8 ovan. Hädanefter kommer motsvarande information i stället att presenteras i tabell- eller textform.

5.1.1 Fördelning av ämnesklasser

I Figur 9 nedan presenteras ett diagram över fördelningen av ämnesklasser i genomsnitt mellan de riskutredningar som ingick i jämförelsestudien. Ämnesklass 3 (brandfarliga vätskor) utgör 58 % av allt farligt gods som transporteras och är således den största andelen. Summan av andelarna blev ursprungligen 94 %. I Figur 9 nedan har andelarna normerats så att summan blir 100 %. De riskutredningar som undersökts i jämförelsestudien presenterade generellt en procentsats för "övriga" ämnesklasser. Således gick det inte att tilldela somliga ämnesklasser korrekt andel och andelarna för dessa ämnesklasser lämnades därför ospecificerade i denna del av examensarbetet. Detta är anledningen till att summan ursprungligen inte blev 100 %.



Figur 9. Diagram över fördelning av farligt gods baserat på de undersökta riskutredningarna i jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016).

I Figur 9 ovan åskådliggörs inte osäkerheterna hos andelarna i respektive ämnesklass. Detta illustreras i stället i Tabell 14 nedan där ett 90 % konfidensintervall har inkluderats. Även här har andelarna normerats så att summan blir 100 % (avrundat). Denna fördelning kan jämföras med den som RIKTSAM presenterar, se Tabell 3 i avsnitt 2.4 ovan.

Tabell 14. Andelar av respektive ämnesklass med specifika värden samt 90 % konfidensintervall, efter normering.

Ämnesklass	Andel (%)		
	Minimum (90 % konfidens)	Väntevärde	Maximum (90 % konfidens)
1	0,33	0,83	1,3
2.1	1,7	5,7	12
2.3	0,09	1,3	3,3
3	42	62	77
4	-	0,32	-
5	0,88	1,7	2,8
6	0,62	1,9	4,1
7	-	0	-
8	24	26	30
9	-	-	-

I Tabell 14 ovan saknas övre och undre intervallgränser för ämnesklasserna 4 och 7 då andelarna för dessa ämnesklasser endast angavs i en riskutredning. För ämnesklass 9 saknas intervallgränser samt väntevärde då andelen för denna ämnesklass inte angavs i någon riskutredning.

I detta examensarbete kommer endast ämnesklasserna 1, 2, 3 och 5 och deras respektive slutkonsekvenser att behandlas vidare.

Ämnesklass 4 utesluts då endast en riskutredning specificerade hur stor andel denna klass utgjorde (0,3 %). Därtill var övrig information kring denna ämnesklass bristfällig.

Ämnesklass 6 behandlas inte vidare i detta examensarbete på grund av att underlaget i jämförelsestudien är bristfälligt. De två slutkonsekvenser kopplade till denna ämnesklass som presenterades var stänk och giftigt gasmoln. Fischer et al. (1998) presenterar ingen beräkningsmodell för konsekvensberäkning av stänk. Gällande konsekvensen gasmoln är underlaget för bristfälligt för att kunna gå vidare med beräkningar. Ingen riskutredning i jämförelsestudien presenterade en mängd för denna ämnesklass. Därutöver finns ingen information om källstyrka, tanktryck eller temperatur.

Ämnesklass 7 behandlas inte på grund av att den endast specificeras av en enda riskutredning och den ansattes i det fallet till 0 %. Därmed finns inga slutkonsekvenser kopplad till denna ämnesklass, vilket omöjliggör en kvantifiering av konsekvensavstånd för denna ämnesklass.

Ämnesklass 8 utesluts då endast stänk och frätskada var angivna slutkonsekvenser för denna ämnesklass. Fischer et al. (1998) presenterar ingen beräkningsmodell för dessa konsekvenser och således är en kvantifiering inte möjlig. Därutöver finns ingen information om mängd, källstyrka, tanktryck eller temperatur.

Ämnesklass 9 behandlas inte då ingen riskutredning specificerade hur stor andel denna ämnesklass utgjorde. Därmed finns inga slutkonsekvenser kopplad till denna ämnesklass, vilket omöjliggör en kvantifiering av konsekvensavstånd i detta fall.

5.1.2 Mängder som transporteras av respektive ämnesklass

I Tabell 15 nedan presenteras PERT-fördelningar av de mängder som transporteras av ämnesklasser 1, 2.1 och 2.3.

Tabell 15. PERT-fördelning av transporterad mängd av ämnesklasser 1, 2.1 och 2.3.

Ämnesklass	Mängd (ton)		
	Minimum (90 % konfidens)	Väntevärde	Maximum (90 % konfidens)
1	0,21	2,82	7,37
2.1	21,5	26,6	33,1
2.3	24,3	29,1	37,9

För ämnesklass 3 redovisades inte transporterad mängd, istället presenterades areastorlek på en pöl vid eventuellt läckage. Väntevärdet för PERT-fördelningen för pölarea blev 26,9 m² medan minimi- och maximivärdena med 90 % konfidens blev 1,70 m² respektive 73,3 m².

För ämnesklass 5 var det endast en riskutredning som redovisade transporterad mängd. Därav kan ingen PERT-fördelning tillskrivas till dessa parametrar.

5.1.3 Frekvens för olycka med farligt gods

De olika riskutredningarna ansatte olika värden för frekvens för trafikolycka med farligt gods. Med denna PERT-fördelning blev väntevärdet $5,23 \cdot 10^{-5}$ och undre och övre gränserna med 90 % konfidensintervall blev $9,02 \cdot 10^{-6}$ respektive $1,12 \cdot 10^{-4}$. Denna indataparameter används senare vid beräkning av individ- och samhällsrisk.

5.1.4 Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass

I Tabell 16 nedan redovisas de sannolikheter för slutkonsekvenser som presenterades i jämförelsestudien.

Tabell 16. Sannolikheter för slutkonsekvenser från jämförelsestudien.

Ämnesklass	Slutkonsekvens	Sannolikhet		
		Minimum (90 % konfidens)	Väntevärde	Maximum (90 % konfidens)
1	Explosion	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$5,02 \cdot 10^{-2}$
2.1	BLEVE	$4,02 \cdot 10^{-5}$	$6,13 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$
	Jetflamma	$5,80 \cdot 10^{-4}$	$3,99 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-3}$
	Gasmolnsexplosion	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$3,74 \cdot 10^{-2}$
2.3	Giftigt gasmoln	$3,71 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$6,77 \cdot 10^{-2}$
3	Pölbrand	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$

5.1.5 Topografi och väderförhållanden

Den enda topografi som undersöks i detta examensarbete är tät skog / stad.

I de riskutredningar som behandlats av Alvarsson & Jansson (2016) var de vanligaste stabilitetsklasserna som användes vid beräkningar B och D. Således är det dessa två som kommer att undersökas i detta examensarbete.

I detta examensarbete tillskrevs en PERT-fördelning till stabilitetsklass B och stabilitetsklass D. Se Tabell 17 nedan.

Tabell 17. Fördelningar över stabilitetsklasser och vindhastigheter som används vid kommande beräkningar.

Stabilitetsklass	Vindhastighet (m/s)		
	Minimum (90 % konfidens)	Väntevärde	Maximum (90 % konfidens)
B	1,31	2,33	3,63
D	6,01	6,17	6,45

För atmosfärstryck, P_a , är underlaget från jämförelsestudien för bristfälligt för att kunna skapa en fördelning. På grund av detta gjordes en PERT-fördelning med minimi-, median- och maximivärde utifrån data som erhållits från SMHI. Minimi- och maximivärde ansattes till 94 620 Pa respektive 105 800 Pa. Dessa värden är hämtade från mätningar som är gjorda under 2000-talet (SMHI, 2018). Medianvärdet ansattes till standardtryck, 101 325 Pa.

5.1.6 Befolkningstäthet och andel av befolkningen inomhus respektive utomhus

Somliga konsultbolag i jämförelsestudien specificerade olika befolkningstätheter på olika avstånd. I detta examensarbete görs förenklingen att det endast tas hänsyn till de befolkningstätheter som ej är kopplade till ett särskilt avstånd eller en särskild tid på dygnet. Väntevärdet för befolkningstätheten (personer per kvadratkilometer) blev 3 150. Med 90 % konfidens är minimivärdet 2 200 och maximum 3 930.

Två konsultbolag i jämförelsestudien specificerade olika värden för andel av befolkningen som befinner sig utomhus beroende på tid på dygnet. Vid sammanställning av denna indataparameter beaktades endast värden från de riskutredningar som inte specificerade tid på dygnet. Väntevärdet i procent för andel av befolkning som befinner sig utomhus blev 84,4. Med 90 % konfidens är minimivärdet 57,7 och maximum 99,0. I detta examensarbete görs förenklingen att samtliga människor som befinner sig utomhus, inom effektzonen, omkommer. Samtliga människor som befinner sig inomhus överlever. Enligt jämförelsestudien framgår det inte hur slutkonsekvenser antas påverka människor inomhus (Alvarsson & Jansson, 2016: 63). Detta är anledningen till att denna förenkling görs i föreliggande examensarbete. Denna förenkling gäller samtliga beaktade slutkonsekvenser.

5.1.7 Representativt ämne

I Tabell 18 nedan redovisas de representativa ämnen som valdes i jämförelsestudien och som kommer att användas i detta examensarbete.

Tabell 18. Representativa ämnen för respektive ämnesklass enligt jämförelsestudien.

Ämnesklass	Representativt ämne
1	Trotyl
2.1	Propan
2.3	Ammoniak
	Svaveldioxid
3	Bensin

För ämnesklass 2.3 kommer två olika ämnen att behandlas vid konsekvensberäkningarna eftersom dessa ger upphov till olika slutkonsekvenser. Ammoniak är mindre giftig än svaveldioxid men tenderar att sprida sig över större områden då den gasen är lättare.

5.1.8 Skadekriterier

Gällande koncentrationer är det i detta examensarbete ammoniak och svaveldioxid som kommer att undersökas. Dessa ämnen är de två som använts i jämförelsestudien för ämnesklass 2.3. Enligt MSB RIB föreligger risk för dödsfall efter 10 minuters exponering vid 30 ppm för svaveldioxid och vid 2 700 ppm för ammoniak. Dessa skadekriterier kommer att användas i detta examensarbete. Det framgår ej i MSB RIB hur stor andel av befolkningen som omkommer vid dessa koncentrationer eller tid för exponering. I detta examensarbete görs antagandet att samtliga människor i området omkommer där koncentrationer uppgår till de siffror som MSB RIB anger. Samtliga människor utanför detta område antas överleva.

I jämförelsestudien var underlaget för värmestrålning bristfälligt varför det inte gick att tillskriva en PERT-fördelning till dessa data. För skadekriterier gällande värmestrålning används därför uteslutande programvaran ALOHA för att erhålla vilken exponering som utgör risk för dödsfall. Strålningen anges i kW/m² och i ALOHA anges när risk för dödsfall föreligger givet en viss exponeringstid.

5.1.9 Tryck och temperatur i tank

Tryck i tank är endast relevant för ämnesklass 2.1 och 2.3. PERT-fördelningen av data från jämförelsestudien resulterade i ett medelvärde på 5,33 bar medan minimi- respektive maxivärde (90 % konfidens) blev 5,02 respektive 5,90 bar.

Endast tre riskutredningar angav temperatur i tank. Dessa riskutredningar angav samma temperatur (288 K), vilket innebär att detta framledes behandlas som en punktskattning.

5.1.10 Källstyrka

Olika källstyrkor angavs för ämnesklass 2.1 respektive 2.3. För ämnesklass 2.1 beräknades källstyrkan med hjälp av andra indataparametrar. För ämnesklass 2.3 skapades en PERT-fördelningen från data erhållen från jämförelsestudien. PERT-fördelningen av data från jämförelsestudien resulterade i ett medelvärde på 0,707 kg/s medan minimi- respektive maxivärde (90 % konfidens) blev 10,1 respektive 27,2 kg/s.

5.1.11 Spridningsvinkel

En PERT-fördelning av data från jämförelsestudien gav upphov till ett medelvärde på 22° och minimi- och maximivärden på 9° respektive 40° för spridningsvinkel.

5.1.12 Poissons kvot och kontraktionsfaktor

Genom att tillskriva en PERT-fördelning från data i jämförelsestudien erhöles medelvärdet 1,32 samt minimi- och maximivärdena 1,17 respektive 1,48 för Poissons kvot.

En likformig fördelning skapades utifrån data om kontraktionsfaktor från jämförelsestudien. Denna fördelning resulterade i ett medelvärde på 0,85 samt minimi- och maximivärde på 0,76 respektive 0,94.

5.1.13 Nedre brännbarhetsgräns

Nedre brännbarhetsgräns varierar med kemiska och fysikaliska egenskaper hos olika ämnen. I detta examensarbete ansattes punktskattningar för denna parameter. För ämnesklass 2.1 används propan som representativt ämne. Den nedre brännbarhetsgränsen erhöles från MSB RIB och är 2,3 volymprocent.

5.2 Konsekvensberäkningar

I detta avsnitt beräknas konsekvensavstånden för de olika slutkonsekvenserna inom respektive ämnesklass. Samtliga ekvationer som används i detta avsnitt är tagna från *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor* av Försvarets forskningsanstalt (Fischer et al., 1998) om inget annat anges.

Värdena för variablerna i ekvationerna utgörs i största möjliga mån av data hämtad från jämförelsestudien. Dessa data används i ekvationerna i form av de fördelningar som tidigare tillskrivits. På detta sätt erhålls ett intervall för konsekvensavståndet som korrelerar med variationen hos indataparametrarna. För somliga slutkonsekvenser fortsatte beräkningarna i ALOHA. Vid denna övergång kunde inte osäkerheterna förmedlas. Efter beräkning av konsekvensavstånd utförs en känslighetsanalys i syfte att identifiera vilka indataparametrar som påverkar resultatet mest.

Därefter användes väntevärdena för dessa avstånd för respektive slutkonsekvens i efterföljande beräkningar. Således beaktades inte respektive konsekvensavstånds konfidensintervall, och därmed osäkerhet, i efterföljande resultat. Denna avgränsning erfordrades av flera skäl.

I vissa fall är informationen från jämförelsestudien är bristfällig, då ansätts istället värden från Fischer et al. (1998), Alveteg (2014) eller MSB. Detta motiveras med att en kvantifiering är omöjlig utan dessa värden. När värden från andra källor än jämförelsestudien används, tydliggörs detta.

5.2.1 Ämnesklass 2.1. Brandfarliga gaser

För denna ämnesklass behandlas tre olika slutkonsekvenser; BLEVE, jetflamma och gasmolnsexplosion.

Enligt Alvarsson & Jansson (2016) ansatte 10 av 11 riskutredningar i jämförelsestudien gasol som representativt ämne för denna ämnesklass. I *bilaga A, tabell A-1* i jämförelsestudien framgår dock att somliga riskutredningar har ansatt propan som representativt ämne. Gasol är en blandning av butan och propan. Enligt MSB:s informationssystem RIB består gasol av >90 % propan. Därmed används fysikaliska data för propan konsekvent i beräkningarna nedan.

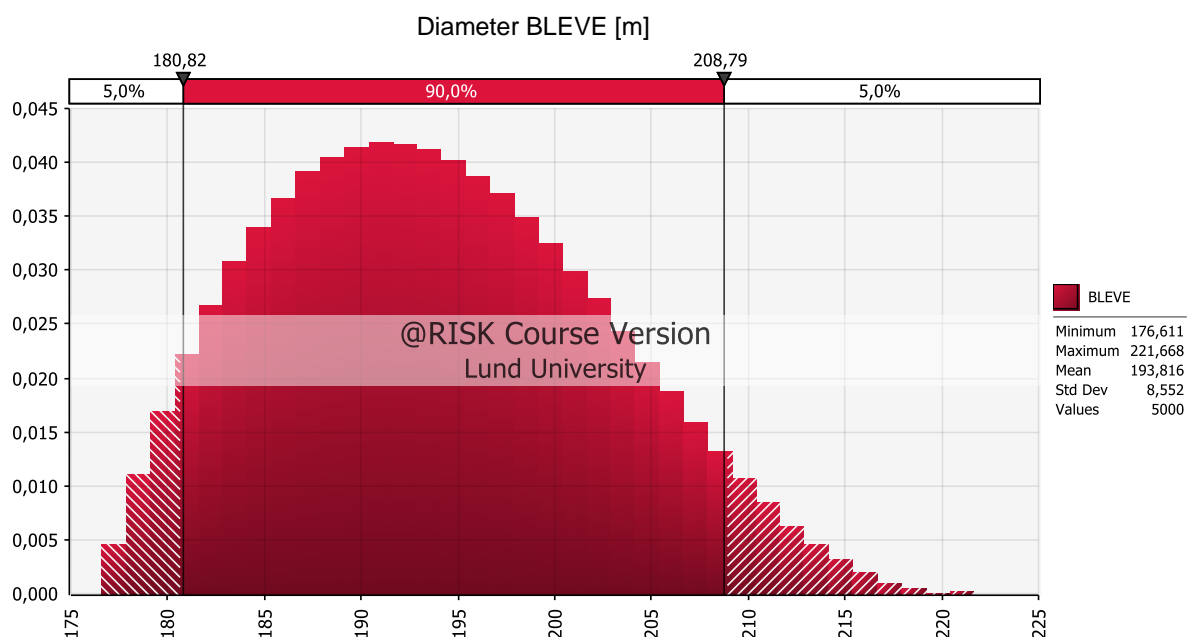
5.2.1.1 BLEVE

Konsekvensavståndet för en BLEVE beräknas med Ekvation 5 nedan:

$$D = 6.5 \cdot M^{1/3} \quad \text{Ekvation 5}$$

D	Eldklotsdiameter	[m]
M	Bränslemassa	[kg]

I jämförelsestudien nämns att tryckkondenserad gas alltid fraktas i tankar med 20-25 ton. Samtliga riskutredningar i jämförelsestudien ansatte en mängd inom detta intervall förutom en som ansatte 40 ton. Dessa värden behandlades enligt förfarandet som beskrivs under avsnitt 5 och tillskrevs en PERT-fördelning. Väntevärdet för eldklotsdiameter blev 194 m med ett 90 % konfidensintervall på 181 m och 209 m som undre respektive övre gräns.

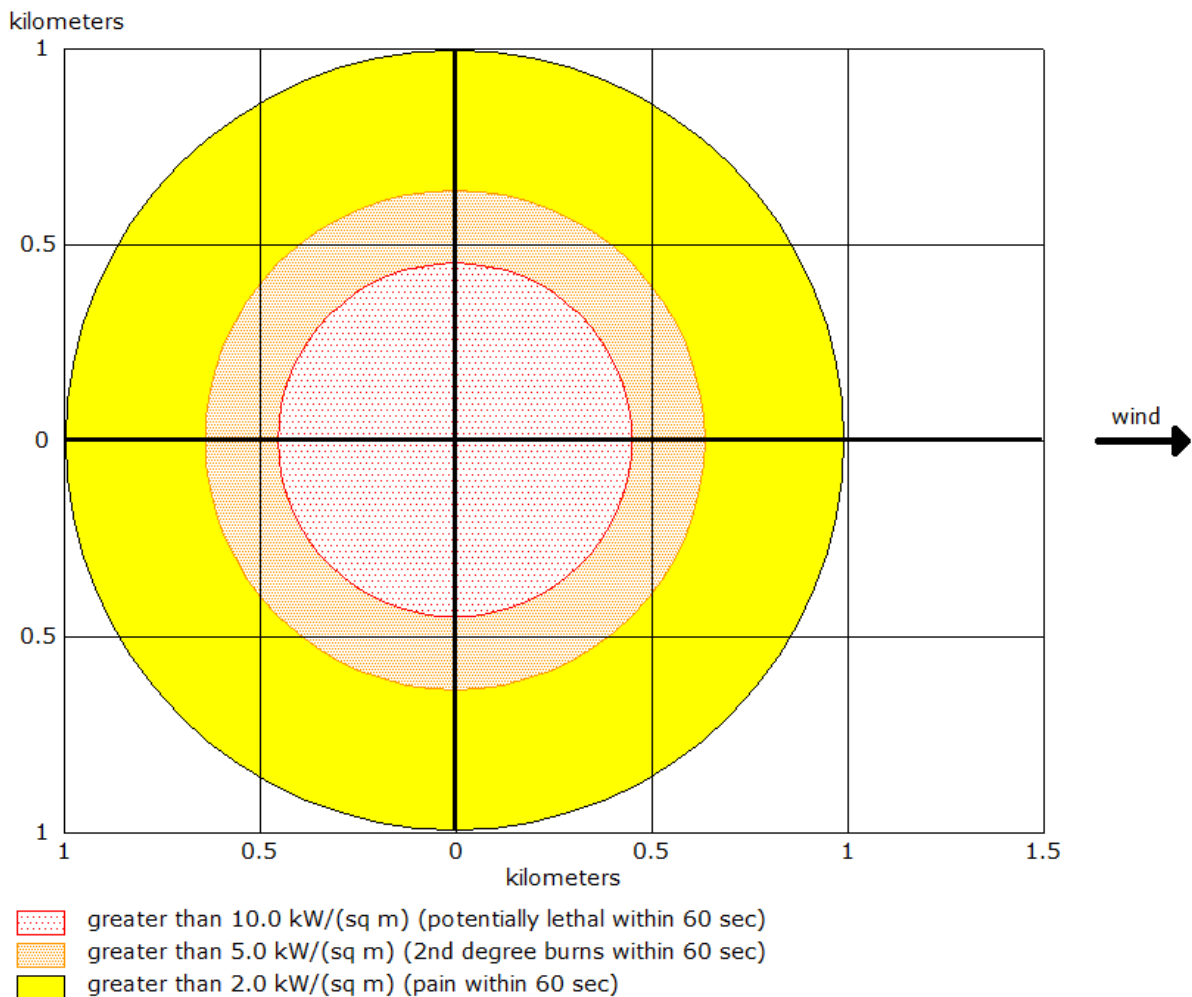


Figur 10. Osäkerhetsanalys för diameter av BLEVE.

Endast en variabel förekommer i Ekvation 5 vilket gör att en känslighetsanalys blir irrelevant att inkludera trots att denna ingick som en fördelning.

För beräkning av konsekvensavståndet för BLEVE behöver värmestrålningen beräknas. Fischer et al. (1998) presenterar en metod för att beräkna strålning, se Bilaga A.1. Data från jämförelsestudien bedöms dock vara för bristfällig för att kunna nyttja denna metod. På grund av detta används i stället programmet ALOHA för att beräkna konsekvensavståndet för värmestrålning.

I ALOHA angavs indataparametrar i enlighet med de indataparametrar som erhöles från jämförelsestudien. På detta vis kunde en simulering genomföras och en BLEVE med diametern 194 meter erhöles. I Figur 11 nedan återges konsekvensavståndet som beräknades utifrån denna BLEVE.



Figur 11. Värmestrålning på olika avstånd från mittpunkt av BLEVE. Riskzonen påverkas inte i märkbar utsträckning av vindens riktning.

I Figur 11 ovan framgår det att en värmestrålning på 10 kW/m^2 uppnås på 451 meters avstånd från utsläppskällan. Enligt ALOHA beskrivs denna värmestrålning som potentiellt dödlig inom 60 s och det är detta skadekriterium som används i detta examensarbete. Således görs antagandet att sannolikheten att omkomma inom detta område är 1 medan sannolikheten att omkomma utanför detta område är 0.

5.2.1.2 Jetflamma

Konsekvensavståndet för en jetflamma beräknas med en ekvation för *Fri cirkulär jet i medvind*. Specifikt för denna modell gäller att koncentrationen överskattas på långa avstånd, men att experimentella data saknas (Fischer et al, 1998: 122). Inget specifikt giltighetsområde med avseende på avstånd anges. Således råder implicit antagandet att nedanstående resultat befinner sig inom modellens giltighetsområde. I Ekvation 6 nedan illustreras beräkning av längd av jetflamma utifrån denna modell.

$$x_2 = \frac{5,95 \cdot Q}{\sqrt{\rho_a(F - Q \cdot u_w)}} \cdot \frac{1}{Y_2} \quad \text{Ekvation 6}$$

x_2	Avstånd till nedre brännbarhetsgräns	[m]
Q	Massflöde från källan	[kg s ⁻¹]
ρ_a	Densitet luft	[kg m ⁻³]
F	Dragkraft, rörelsemängdsflöde	[N]
u_w	Vindhastighet	[m s ⁻¹]
Y_2	Nedre brännbarhetsgräns	[kg kg ⁻¹]

För att beräkna massflödet från källan används Ekvation 7 nedan.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \frac{P_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad \text{Ekvation 7}$$

C_d	Kontraktionsfaktor	[-]
A	Tvårsnittsarea hos hål	[m ²]
P_0	Tryck i behållare	[N m ⁻²]
T_0	Temperatur i behållare	[K]
γ	Poissons kvot (cp/cv)	[-]

Vidare erhålls dragkraften, F , med Ekvation 8 nedan:

$$F = Q \cdot u_e + A_e \cdot (P_e - P_a) \quad \text{Ekvation 8}$$

u_e	Utloppshastighet	[m s ⁻¹]
A_e	Håldiameter	[m]
P_e	Utloppstryck	[N m ⁻²]
P_a	Atmosfärstryck	[N m ⁻²]

Utloppshastigheten, u_e , erhålls med hjälp av Ekvation 9 nedan:

$$u_e = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_e} \quad \text{Ekvation 9}$$

R	Gaskonstant	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T _e	Utloppstemperatur	[K]
$R = \frac{R_*}{m}$		Ekvation 10
R.	Universella gaskonstanten = 8 314	[J K ⁻¹ mol ⁻¹]
m	Massa hos en kilomol av undersökt ämne	[kg kmol ⁻¹]

Vidare erhålls T_e med Ekvation 11 nedan:

$$T_e = \frac{2}{\gamma + 1} \cdot T_0 \quad \text{Ekvation 11}$$

Utloppstrycket, P_e, beräknas enligt Ekvation 12 nedan:

$$P_e = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \cdot P_0 \quad \text{Ekvation 12}$$

Förtydligande av tillvägagångssätt för tillskrivning av fördelningar till ingående parametrar görs i nedanstående paragrafer och en sammanställning av värden och fördelningar för dessa parametrar görs i Tabell 19 nedan.

Densiteten för luft, ρ_a, varierar med bland annat temperatur. Teoretiskt sett hade det således varit möjligt att tillskriva en fördelning till denna parameter. Emellertid framgår det inte i jämförelsestudien hur de olika riskutredningarna har hanterat denna parameter. På grund av detta ansattes densitet för luft till 1,28 kg/m³. Detta är ett tabellvärde och gäller för torr luft vid 0 °C och 1 bar (Alveteg, 2014: 12).

Vindhastigheten, u_w, angavs i flera riskutredningar och värdet varierade från 1 m/s till 7 m/s, med 3 m/s som medianvärde. För stabilitetsklass B tilldelades denna parameter en PERT-fördelning med minimi- och maximivärde på 1 respektive 5 medan medianen ansattes till 3. För stabilitetsklass D användes minimi- och maximivärdena 6 respektive 7 medan medianen ansattes till 6. För slutkonsekvensen jetflamma gjordes endast beräkningar med stabilitetsklass B.

Nedre brännbarhetsgräns för propan, Y₂, erhöles från MSB:s informationssystem RIB. Enligt fysikaliska data ligger brännbarhetsområdet för propan mellan 2,3 och 9,5 volymprocent. Den nedre gränsen ansattes som punktskattning och omvandlades sedan till massprocent i enlighet med det tillvägagångssätt som beskrivs i Ekvation 40.

Håldiametern angavs av flera riskutredningar i jämförelsestudien. Baserat på denna diameter och antagandet att det rör sig om runda hål kunde utloppsarean, A_e, beräknas. Utifrån de beräknade värdena tillskrevs en PERT-fördelning.

För atmosfärstryck, P_a , gjordes en PERT-fördelning med minimi-, median- och maximivärde 94 620 Pa, 101 325 Pa respektive 105 800 Pa.

Ingen information om värdet för Poissons kvot, γ , återfanns i jämförelsestudien. Vanligen finns data tillgänglig för detta som oftast varierar mellan 1,1 och 1,6 medan värdet 1,3 i regel används för utströmningsberäkningar (Fischer et al, 1998: 66). Denna parameter har därför tillskrivits en PERT-fördelning med minimi- och maximivärde på 1,1 respektive 1,6 medan medianen ansattes till 1,3.

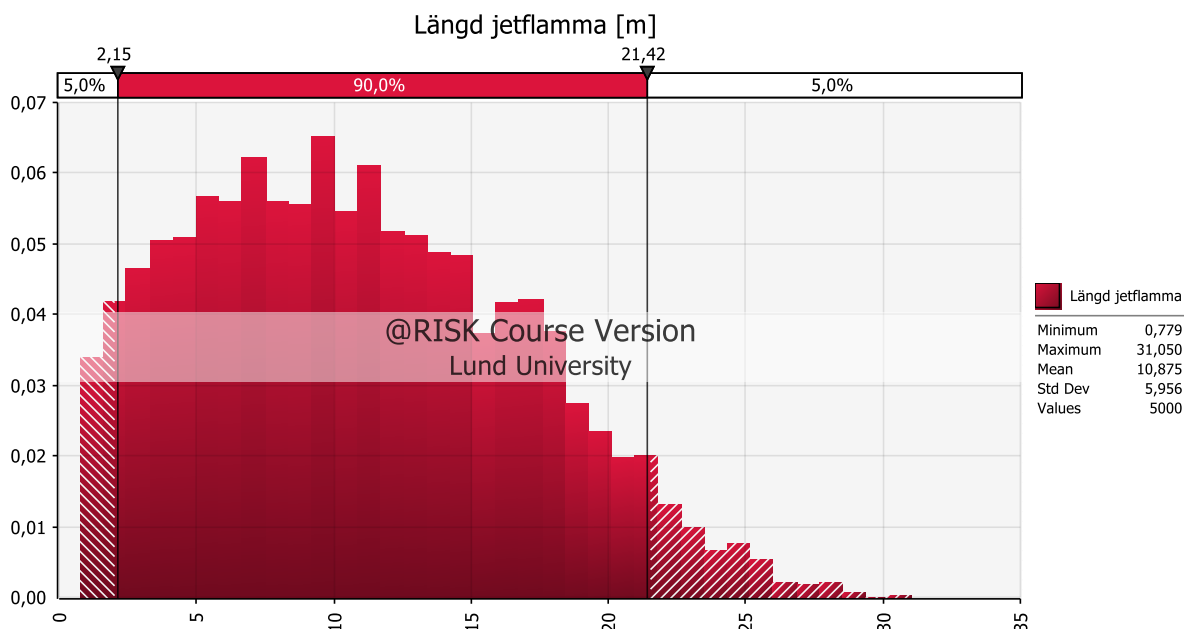
Temperaturen i behållare, T_0 , angavs av tre riskutredningar i jämförelsestudien. Detta värde var 288 K för samtliga tre riskutredningar. Av denna information från jämförelsestudien kan därför ingen fördelning skapas. Det bedöms dock vara rimligt att temperaturen i tanken kan variera med minimi- och maximitemperatur på 273 K (0 °C) respektive 298 K (25 °C) samt att 288 K (15 °C) utgör ett medianvärde. Därför tillskrivs en PERT-fördelning med dessa värden för temperatur i behållare.

I Tabell 19 nedan sammanställs vilka värden eller fördelningar som tillskrivits olika parametrar som erhålls från jämförelsestudien respektive andra källor.

Tabell 19. Specifikation av värden/fördelningar av parametrar i ekvationerna för beräkning av konsekvensavstånd för jetflamma och källor som dessa värden/fördelningar baseras på.

Variabel	Källa	Värde/fördelning
Densitet luft (ρ_a)	Alveteg (2014)	1,28
Vindhastighet (u_w)	Jämförelsestudie	RiskPert(1;3;5)
Nedre brännbarhetsgräns (Y_2)	MSB	0,035
Hålstorlek (A_e)	Jämförelsestudie	RiskPert($7,9 \cdot 10^{-5}$; $3,8 \cdot 10^{-4}$; $9,5 \cdot 10^{-3}$)
Atmosfärstryck (P_a)	SMHI	RiskPert(94620;101325;105800)
Poissons kvot (γ)	FOA	RiskPert(1,1;1,3;1,6)
Tanktemperatur (T_0)	Tidigare resonemang	RiskPert(273;288;298)

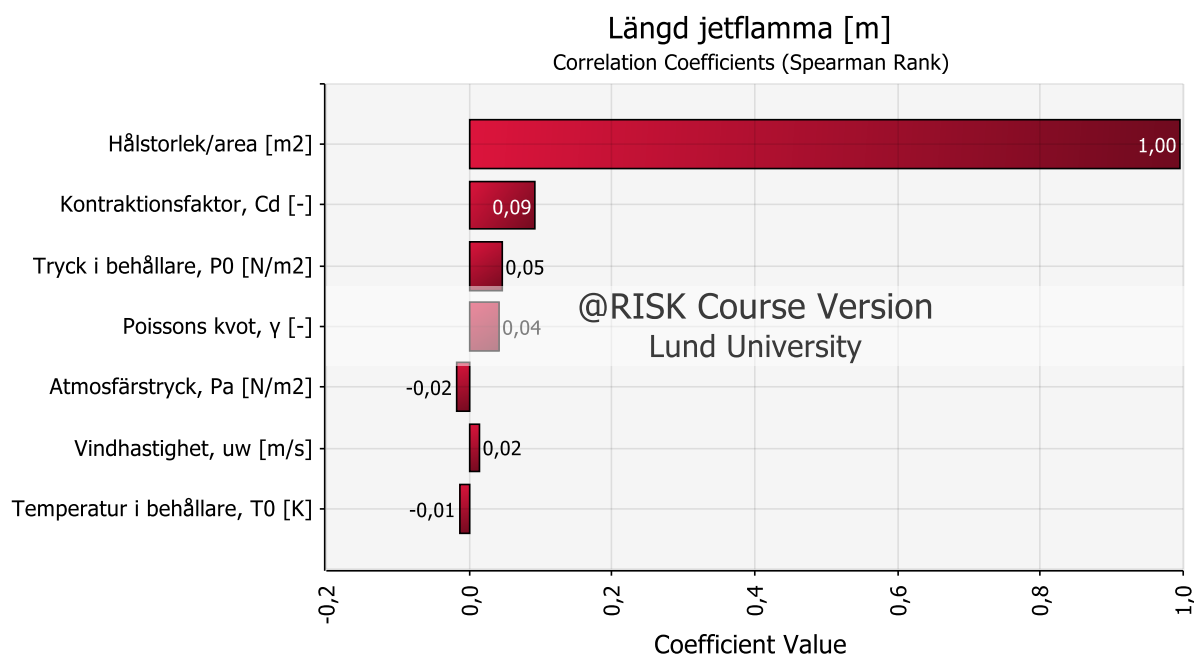
Baserat på de värden som presenterats i Tabell 19 ovan kunde längden på en jetflamma beräknas med hjälp av Ekvation 6. Väntevärdet på längden för en jetflamma beräknades till 11 meter, vilket åskådliggörs i Figur 12 nedan.



Figur 12. Osäkerhetsanalys för jetflammans längd.

För beräkning av konsekvensavståndet för jetflamma behöver värmestrålningen beräknas. Fischer et al. (1998) presenterar en metod för att beräkna strålning (se Bilaga A.1). Data från jämförelsestudien bedöms dock vara för bristfällig för att kunna nyttja denna metod. På grund av detta används i stället programmet ALOHA för att beräkna konsekvensavståndet för värmestrålning.

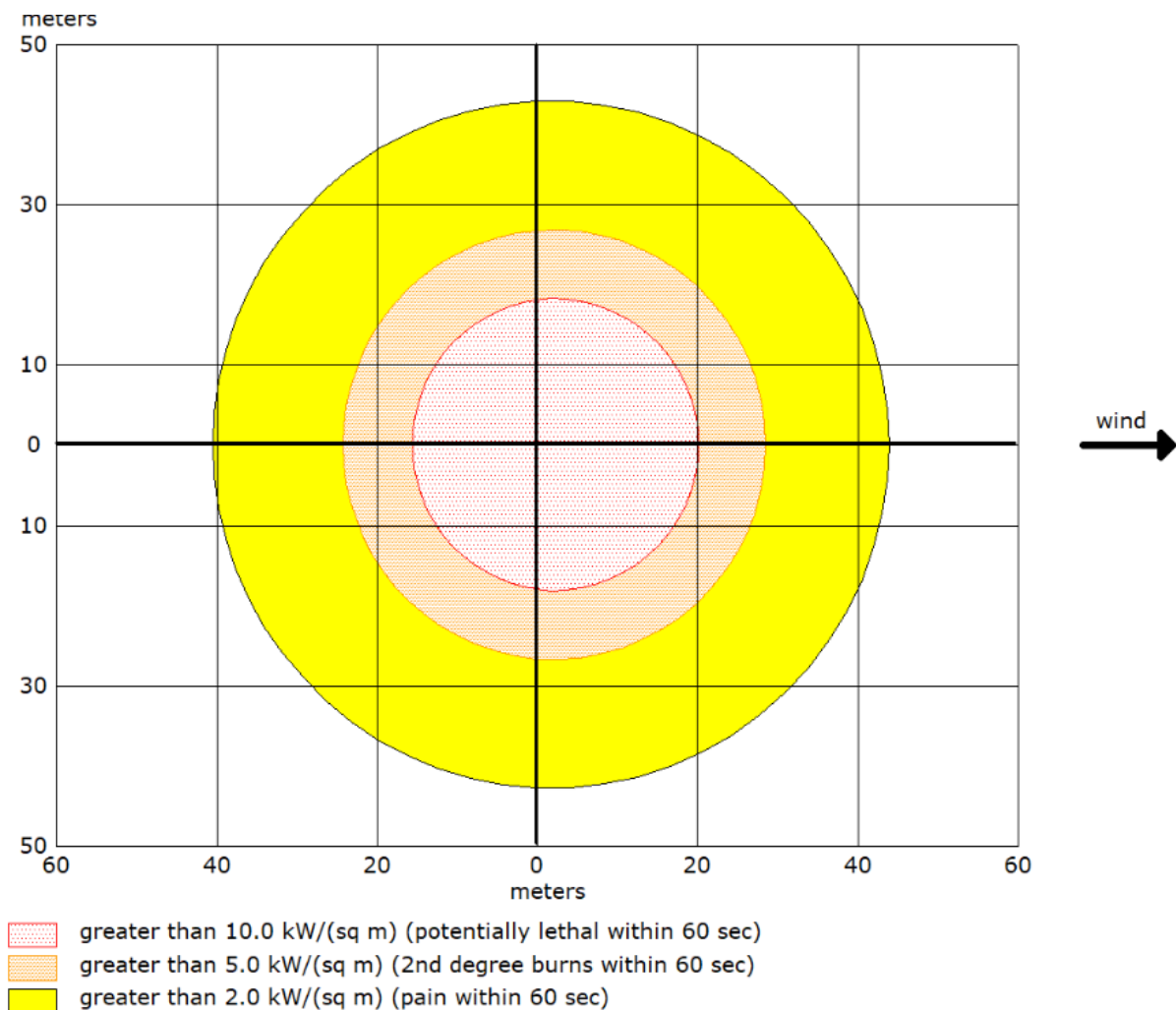
I Figur 13 nedan presenteras en känslighetsanalys (Spearman's rangkorrelation) för beräkning av jetflammans längd.



Figur 13. Spearman's rangkorrelationkoefficienter för indataparametrar vid beräkning av jetflammans längd.

I ALOHA angavs indataparametrar i enlighet med de indataparametrar som erhöles från jämförelsestudien. På detta vis kunde en simulering genomföras och en jetflamma med

längden 11 meter erhölls. I Figur 14 nedan återges konsekvensavståndet som beräknades utifrån denna jetflamma.



Figur 14. Värmestrålning på olika avstånd från utsläppskällan. Konsekvensens utbredning approximeras konservativt som cirkulär av programmet. Riskzonen är något förskjuten i vindens riktning.

I Figur 14 ovan framgår det att en värmestrålning på 10 kW/m² uppnås på 20 meters avstånd från utsläppskällan. Enligt ALOHA beskrivs denna värmestrålning som potentiellt dödlig inom 60 s och det är detta skadekriterie som används i detta examensarbete. Således görs antagandet att sannolikheten att omkomma inom detta område är 1 medan sannolikheten att omkomma utanför detta område är 0. Riskzonen är något förskjuten i vindens riktning vilket gör att konsekvensavståndet är lite kortare på den sida varifrån vinden blåser. Detta beaktas inte vid beräkning av individ- och samhällsrisk i detta examensarbete. Istället antages att konsekvensavståndet är 20 meter i samtliga riktningar.

Nu finns tillräckligt med information om denna slutkonsekvens för att kunna beräkna dess bidrag till individ- och samhällsrisk.

5.2.1.3 Gasmolnsexplosion

Fischer et al. (1998) presenterar en punktlista för hur beräkning av tryck från gasmolnsexplosion ska genomföras. Detta tillvägagångssätt är emellertid inte applicerbart i

detta examensarbete då det kräver detaljerad information kring platsspecifika förutsättningar. Således kommer denna slutkonsekvens inte att behandlas vidare i detta examensarbete vilket innebär en begränsning och medför en underskattning av individ- och samhällsrisik.

5.2.2 Ämnesklass 2.3. Giftiga gaser

Den slutkonsekvens som identifierades inom denna ämnesklass i jämförelsestudien var giftigt gasmoln.

5.2.2.1 Giftigt gasmoln

För denna ämnesklass behandlas slutkonsekvensen giftigt gasmoln. I Ekvation 13 nedan illustreras en spridningsmodell för passiv spridning som presenterats i Fischer et al. (1998). Kompletterande matematiska samband återfinns i Bilaga A.2.

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot U} \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}} \cdot \left[e^{-\frac{(z-H_{eff})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H_{eff})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \right] \quad \text{Ekvation 13}$$

$\chi(x, y, z)$	Koncentration som funktion av x, y, z	[kg m ⁻³]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Dispersionskoefficienter	[m]
H_{eff}	Utsläppskällans höjd över mark	[m]
Q	Massflöde	[kg s ⁻¹]
U	Vindhastighet	[m s ⁻¹]
(x, y, z)	Avstånd från utsläppskälla i tre dimensioner (x = längs vindriktningen, y = vinkelrätt mot vindriktningen, z = vertikalt mot vindriktningen)	[m]

I Tabell 20 nedan redogörs för vilka variabler som används samt deras värden eller fördelningar för att beräkna Ekvation 13. För fullständiga beräkningar hänvisas till Bilaga A.2.

Tabell 20. Information kring de variabler som används för att beräkna koncentrationen av giftig gas på olika avstånd.

Variabel	Källa	Värde/fördelning
Källstyrka (Q)	Jämförelsestudie	RiskPert(0,08;0,19;60)
Densitet luft (ρ_a)	Alveteg (2014)	1,28
Molmassa för luft (m_g)	MSB RIB	29
Molmassa för utsläppt substans (m_a) (ammoniak)	MSB RIB	17
Molmassa för utsläppt substans (m_a) (svaveldioxid)	MSB RIB	64,1
H_{eff}	Kurslitteratur	Riskuniform(0;1,5)
Vindhastighet (U)	Jämförelsestudie	RiskPert(1;2;5) för stabilitetsklass B, RiskPert(6;6;7) för stabilitetsklass D

Genom att substituera Ekvation 32 och Ekvation 33 in i Ekvation 31 (se Bilaga A.2) går det nu att beräkna koncentrationen $\chi(x, 0, 0)$. Detta utvidgade uttryck presenteras i Ekvation 14 nedan.

$$\chi(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \frac{a_y(x + x_{y0})}{(1 + b_y(x + x_{y0}))^{Y_y}} K_{rp} K_{yt} \frac{a_z(x + x_{z0})}{(1 + b_z(x + x_{z0}))^{Y_z}} K_{rp} U} \quad \text{Ekvation 14}$$

a_y, a_z	Stabilitetsberoende parametrar	[-]
b_y, b_z	Stabilitetsberoende parametrar	[-]
Y_y	Stabilitetsberoende parameter	[-]
x_{y0}, x_{z0}	Avstånd till virtuella källor	[m]
K_{rp}	Korrigerig för underlagets skrovlighet	[-]
K_{yt}	Samplingtids (medelvärdesbildningstidens) påverkan på horisontell spridning	[-]

I Tabell 36 (se Bilaga A.2) redogörs för värden på stabilitetsberoende parametrar, korrigerig för underlagets skrovlighet och medelvärdesbildningstidens påverkan på horisontell spridning. Utifrån de värden som erhöles för dessa parametrar följer det att avstånd till virtuella källor kan beräknas. för värden på stabilitetsberoende parametrar, korrigerig för underlagets skrovlighet och medelvärdesbildningstidens påverkan på horisontell spridning. Utifrån de värden som erhöles för dessa parametrar följer det att avstånd till virtuella källor kan beräknas.

Utifrån resultat erhållna med hjälp av Ekvation 14 ovan kan nu koncentrationer såväl som konfidensintervall för olika avstånd presenteras. Detta görs för ammoniak med stabilitetsklass B i Tabell 21 och med stabilitetsklass D i Tabell 22.

Tabell 21. Beräknad koncentration av ammoniak på olika avstånd. Koncentrationerna i tabellen gäller för stabilitetsklass B.

Avstånd [m]	Koncentration ammoniak (ppm)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
10	11 060	85 164	227 217
20	3 343	31 983	89 340
30	1 619	16 939	48 569
40	952	10 514	31 138
45	764	8 600	25 446
50	714	7 165	23 974
70	327	3 940	11 880

Tabell 22. Beräknad koncentration av ammoniak på olika avstånd. Avstånden och koncentrationerna i tabellen gäller för stabilitetsklass D.

Avstånd (m)	Koncentration ammoniak (ppm)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
10	9 410	55 227	96 684
20	3 312	23 819	44 181
30	1 701	13 939	26 934
40	1 039	9 319	18 569
50	1 035	6 728	18 517
60	507	5 111	10 658
70	383	4 027	8 553

I RIB anges att vid 10 minuters exponering av 2 700 ppm ammoniak föreligger risk för dödsfall. I Tabell 22 ovan framgår det att mellan 40 och 50 meter underskrider väntevärdet för koncentrationen 8 500 ppm. Vid drygt 70 meter underskrider även den övre gränsen med 90 % konfidens 8 500 ppm.

Det andra representativa ämnet som angavs i jämförelsestudien för denna ämnesklass var svaveldioxid. Denna gas är tyngre än luft och modellen i Fischer et al. (1998) som används för spridning av tunggas anges i Ekvation 15 nedan.

$$\chi_m(x) = \chi(x, 0, 0) = \frac{85Q \cdot K_r^{-1} \cdot K_s}{\left(x + \sqrt{85\pi \cdot K_r^{-1} \cdot K_s \cdot \sigma_{z0} \cdot \sigma_{y0}}\right)^2 \cdot U} \quad \text{Ekvation 15}$$

χ_m	Högsta koncentration i centrum av plym i marknivå	[kg m ⁻³]
K_r	Korrektionsfaktor för skrovlighet av underlag vid tunggasspridning	[-]
K_s	Korrektionsfaktor för atmosfärens stabilitet vid tunggasspridning	[-]
σ_{y0}, σ_{z0}	Initiala dimensionsmått i atmosfärspridningsmodell (standardavvikelse vid avstånd x=0)	[m]

Tunggaseffekterna blir emellertid försumbara då tillväxten av gasmolnets plym kan likställas med värden som gäller för passiv spridning. För att avgöra när tunggasmodellen är giltig används avståndsvillkoret i Ekvation 16 nedan.

$$x \leq \frac{0,0037L_b}{(\sigma'_{yp})^3} - \frac{\sigma_{y0}^{3/2}}{0,35L_b^{1/2}} = x_{MAX} \quad \text{Ekvation 16}$$

L_b	Längdskala för tunggasutsläpp	[m]
σ'_{yp}	Tillväxthastighet av passiv plym med avstånd x , $d\sigma_y/dx$	[m m ⁻¹]

För stabilitetsklass B beräknades modellens giltighetsområde till 42 meter. För stabilitetsklass D erhöles ett negativt värde vilket innebär att modellen för passiv spridning, se Ekvation 13 ovan, kan användas istället (Fischer et al., 1998: 207).

De fördelningar som presenteras i Tabell 20 ovan användes även vid beräkning av koncentration svaveldioxid. I Tabell 23 nedan återges resultatet för beräknad koncentration svaveldioxid på olika avstånd med stabilitetsklass B. I Tabell 24 nedan återges motsvarande information för stabilitetsklass D.

Tabell 23. Beräknad koncentration av svaveldioxid på olika avstånd. Avstånden och koncentrationerna i tabellen gäller för stabilitetsklass B.

Avstånd (m)	Koncentration svaveldioxid (ppm)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
25	7 500	37 059	56 297
50	185	2 607	8 436
100	50	701	2 269
200	13	179	579
300	6	79	256
400	3	44	142
500	2	28	90

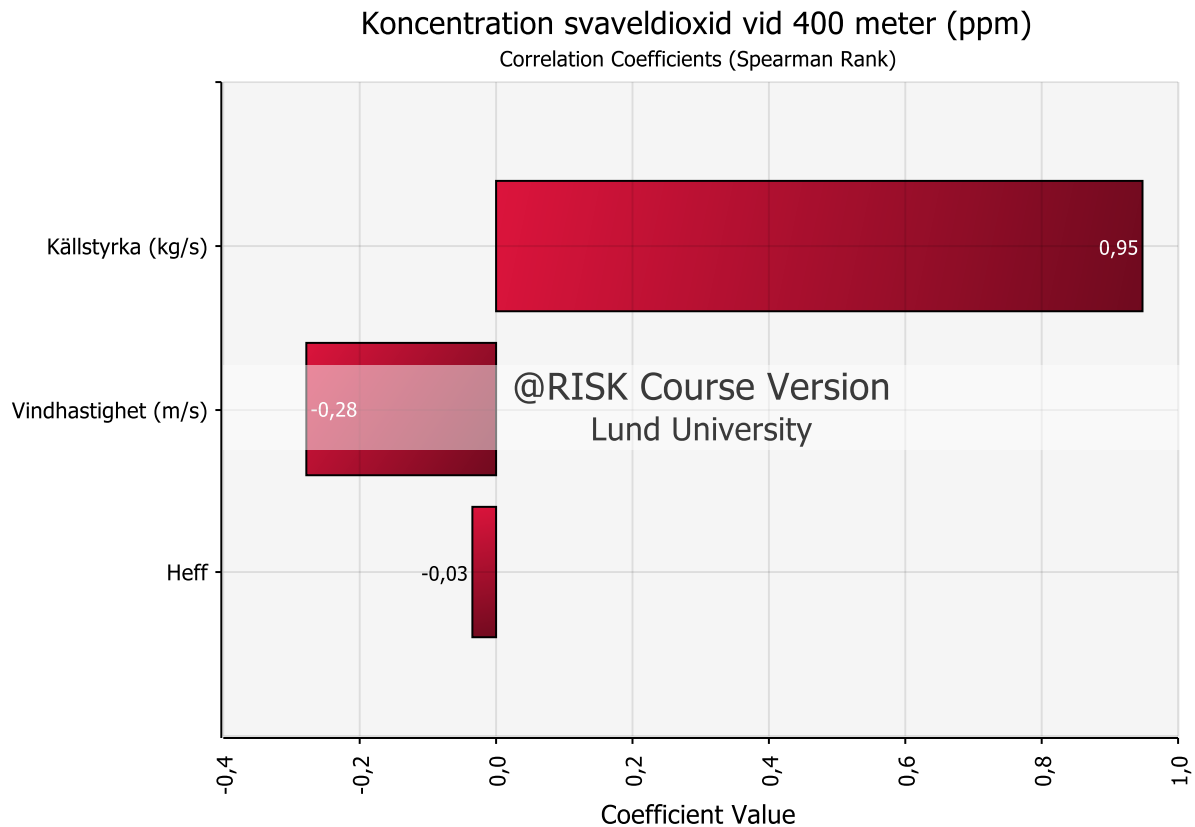
Tabell 24. Beräknad koncentration av svaveldioxid på olika avstånd. Avstånden och koncentrationerna i tabellen gäller för stabilitetsklass D.

Avstånd (m)	Koncentration svaveldioxid (ppm)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
25	839	6 214	13 369
50	247	2 265	5 207
100	68	745	1 813
200	19	226	574
300	9	111	284
400	5	66	172
500	3	45	116
600	2	32	85
650	2	28	74

Enligt MSB:s informationssystem RIB föreligger risk för dödsfall vid tio minuters exponering av 30 ppm svaveldioxid.

I efterföljande beräkningar kommer endast ett representativt ämne och en stabilitetsklass att undersökas. Denna avgränsning motiveras med resursbrist. Svaveldioxid har större konsekvensavstånd än ammoniak och stabilitetsklass B är den vanligaste stabilitetsklassen som anges i jämförelsestudien. Baserat på detta kommer svaveldioxid att användas som representativt ämne och stabilitetsklass B kommer att antas gälla i resterande delar av detta examensarbete.

I Figur 15 nedan presenteras en känslighetsanalys för koncentration svaveldioxid (ppm) på avståndet 400 meter från utsläppskällan för stabilitetsklass B.



Figur 15. Känslighetsanalys för koncentration av svaveldioxid (ppm) på avståndet 400 meter för stabilitetsklass B.

Vid beräkning av koncentration svaveldioxid på avståndet 400 meter med stabilitetsklass B var källstyrka den indataparameter som påverkade mest. Vindhastigheten och utsläppskällans höjd över mark hade en negativ korrelation med koncentrationen. Parametrarna hade samma inbördes rangordning men andra koefficienter för samtliga undersökta avstånd.

5.2.3 Ämnesklass 3. Brandfarliga vätskor

Denna ämnesklass bedömdes utgöra störst andel av farligt gods på väg av 13 riskutredningar i jämförelsestudien. För denna ämnesklass identifierades två slutkonsekvenser; pölbrand och giftigt gasmoln. För denna ämnesklass angav elva riskutredningar i jämförelsestudien ett representativt ämne. Tio av dessa angav bensin som representativt ämne. Således kommer fysikaliska data för bensin att användas konsekvent i följande beräkningar när så är applicerbart.

5.2.3.1 Pölbrand

I Ekvation 17 nedan åskådliggörs hur flamhöjd beräknas.

$$h_f = d_p \cdot 42 \left[\frac{b'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d_p}} \right]^{0,61} \quad \text{Ekvation 17}$$

h_f	Flamhöjd (pölbrand)	[m]
b'	Förbränningshastighet per ytenhet vid pölbrand	[kg m ⁻² s ⁻¹]
ρ_a	Densitet luft	[kg m ⁻³]
g	Tyngdacceleration = 9,81	[m s ⁻²]
d_p	Pöldiameter	[m]

Från jämförelsestudien erhöles data för area på pöl. Ekvation 17 erfordrar att diameter för pöl anges. Under antagandet att pölen är cirkulär kan en diameter beräknas. Pöldiameteren beräknades till 13 m med ett 90 % konfidensintervall med 4,5 m och 20 m som undre respektive övre gräns. Vidare bygger Ekvation 17 på att vindens inverkan försummas samt att $0,8 < h_f / d_f < 4$.

I Tabell 25 nedan återges varifrån de ingående variablerna i Ekvation 17 får sina värden eller fördelningar ifrån.

Tabell 25. Information kring de variabler som används för att beräkna flamhöjd.

Variabel	Källa	Värde/fördelning
Pöldiameter (d_p)	Jämförelsestudie	RiskPert(4,46;12,15;20,05)
Förbränningshastighet (b')	FOA	0,048
Densitet luft (ρ_a)	Alveteg (2014)	1,28
Tyngdacceleration (g)	FOA	9,81

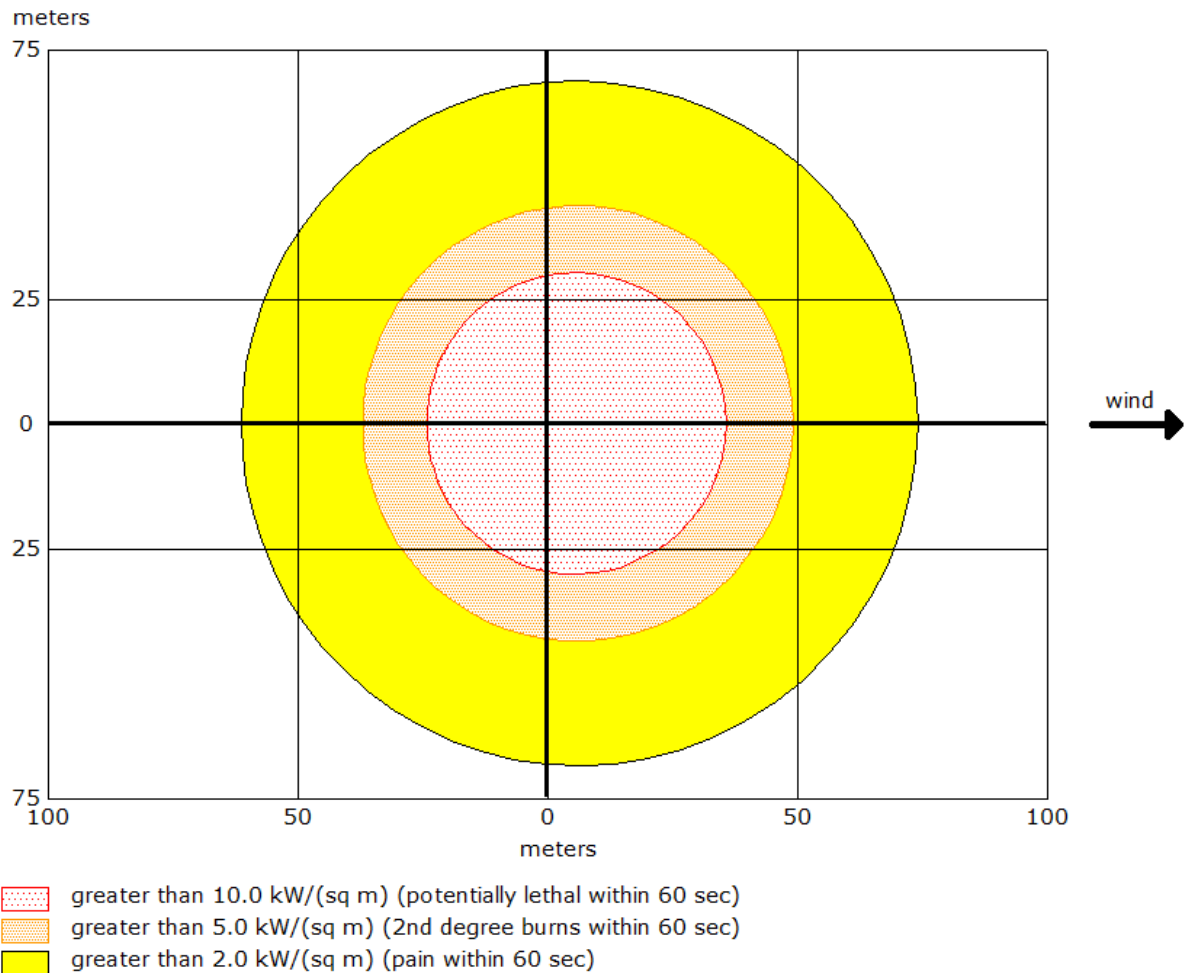
Värdet för variabeln förbränningshastighet, b' , erhöles från Fischer et al. (1998) och är det teoretiskt högsta värdet.

Väntevärdet för flamhöjden beräknades till 16 m med ett 90 % konfidensintervall mellan 8 m och 23 m som undre respektive övre gräns. Vid beräkning av flamhöjden, se Ekvation 17, är det endast en variabel som utgörs av en fördelning medan övriga är konstanter, vilket medför att en känslighetsanalys är redundant.

För beräkning av konsekvensavståndet för pölbrand behöver värmestrålningen beräknas. Samma problematik som uppstod vid beräkning av värmestrålning från jetflamma med modeller från Fischer et al. (1998) uppstår även här. På grund av detta används i stället programmet ALOHA för att beräkna konsekvensavståndet för värmestrålning.

I ALOHA angavs indataparametrar i enlighet med de indataparametrar som erhöles från jämförelsestudien. På detta vis kunde en simulering genomföras och en pölbrand med

pölarean 133 m² och flamhöjden 16 meter erhöles. I Figur 16 nedan återges konsekvensavståndet som beräknades utifrån denna flamma.



Figur 16. Värmestrålning på olika avstånd från pölens mitt. Konsekvensens utbredning approximeras konservativt som cirkulärt av programmet. Riskzonen är förskjuten i vindens riktning.

I Figur 16 ovan framgår det att en värmestrålning på 10 kW/m² uppnås på 36 meters avstånd från utsläppskällan. Enligt ALOHA beskrivs denna värmestrålning som potentiellt dödlig inom 60 s och det är detta skadekriterium som används i detta examensarbete. Således görs antagandet att sannolikheten att omkomma inom detta område är 1 medan sannolikheten att omkomma utanför detta område är 0. Riskzonen är förskjuten i vindens riktning vilket gör att konsekvensavståndet är kortare på den sida varifrån vinden blåser. Detta beaktas inte vid beräkning av individ- och samhällsrisk i detta examensarbete. Istället antages att konsekvensavståndet är 36 meter i samtliga riktningar.

5.2.3.2 Fordonsbrand

Fischer et al. (1998) presenterar ingen beräkningsmodell för att avgöra konsekvensavståndet för denna slutkonsekvens. Alvarsson & Jansson (2016) skriver att tre av de fyra riskutredningar som beaktade fordonsbrand, likställde denna slutkonsekvens med pölbrand. Baserat på detta utförs inga ytterligare beräkningarna för slutkonsekvensen fordonsbrand i detta examensarbete.

5.2.3.3 Gasmolnsbrand

Endast en riskutredning i jämförelsestudien undersöker avdunstning med fördröjd antändning som leder till gasmolnsbrand. Detta omöjliggör tillskrivning av fördelningar för relevanta indataparametrar som fångar upp variation mellan olika riskutredningar.

5.2.3.4 Giftigt gasmoln

Om en pöl från ett utsläpp av brandfarlig vätska ej antänder finns likväl en risk för att ett giftigt gasmoln ska uppstå. I praktiken avdunstar pölen och sprider sig enligt gasspridningsmodellen i Ekvation 13 eller förenklat enligt Ekvation 31 som beskrivits i avsnitt 5.2.2.1 ovan. För att kunna beräkna källstyrkan Q som är en indataparameter i dessa ekvationer behöver först och främst massflödet från pölen beräknas enligt förångningsekvationer enligt kurslitteratur. I Ekvation 18 nedan beskrivs hur detta massflöde beräknas.

$$\dot{m}_s = \dot{m}_s'' \cdot A_p \quad \text{Ekvation 18}$$

\dot{m}_s	Massflöde	[g s ⁻¹]
\dot{m}_s''	Massflöde från ytan	[g m ⁻² s ⁻¹]
A_p	Area av pöl	[m ²]

För att kunna beräkna massflödet från ytan behöver Ekvation 19 nedan användas.

$$\dot{m}_s'' = (h/C_{p_{luft}}) \cdot \ln(1 + B) \quad \text{Ekvation 19}$$

h	Konvektivt värmeövergångstal	[W m ⁻² K ⁻¹]
$C_{p_{luft}}$	Värmekapacitet för luft = 1	[J g ⁻¹ K ⁻¹]
B	Dimensionslöst masstransporttal	[-]

Det konvektiva värmeövergångstalet kan beräknas med hjälp av Ekvation 20 nedan.

$$h = Nu \cdot k_{luft}/D \quad \text{Ekvation 20}$$

Nu	Nusselts tal	[-]
k_{luft}	Konduktivitet för luft (= 0,02568)	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
D	Pöldiameter	[m]

För att beräkna Nusselts tal behöver Ekvation 21 nedan användas.

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr_{luft}^{1/3} \quad \text{Ekvation 21}$$

Re	Reynolds tal	[-]
------	--------------	-----

Pr	Prandtl's tal för luft (= 0,71)	[-]
----	---------------------------------	-----

Reynolds tal kan sedan beräknas med hjälp av Ekvation 22 nedan.

$$Re = u \cdot D / \nu \quad \text{Ekvation 22}$$

u	Vindhastighet	[m s ⁻¹]
---	---------------	----------------------

Pr	Prandtl's tal för luft (= 0,71)	[-]
----	---------------------------------	-----

Nu är det möjligt att beräkna det konvektiva värmeövergångstalet. För att sedan kunna beräkna massflödet från ytan behöver emellertid masstransporttalet beräknas först. Detta görs med hjälp av Ekvation 23 nedan.

$$B = (Y_{F\infty} - Y_{FW}) / (Y_{FW} - Y_{FR}) \quad \text{Ekvation 23}$$

$Y_{F\infty}$	Massfraktion bränsle i luft ovanför bränsleytan	[-]
---------------	---	-----

Y_{FW}	Massfraktion bränsle i vätskeölen	[-]
----------	-----------------------------------	-----

Y_{FR}	Massfraktion bränsle vid ytan i gasfas	[-]
----------	--	-----

Massfraktionen bränsle i luft ovanför bränsleytan antas vara 0. Massfraktion bränsle vid ytan i gasfas antas vara 1. Massfraktion bränsle i vätskeölen beräknas enligt Ekvation 24 nedan.

$$Y_{FW} = \frac{1}{1 + [(p/p_F) - 1] \cdot [M_{luft}/M_F]} \quad \text{Ekvation 24}$$

I Tabell 26 nedan framgår det vilka parametrar som ingår som fördelningar vid beräkning av gasmolnets spridning.

Tabell 26. Sammanställning av de variabler som ingår som fördelningar vid beräkning av koncentration på olika avstånd.

Variabel	Källa	Värde/fördelning
Pöldiameter (d_p)	Jämförelsestudie	RiskPert(4,5;12;20)
Vindhastighet (U)	Jämförelsestudie	RiskPert(1;3;5)
Densitet luft (ρ_a)	Alveteg (2014)	1,28
Tyngdacceleration (g)	FOA	9,81

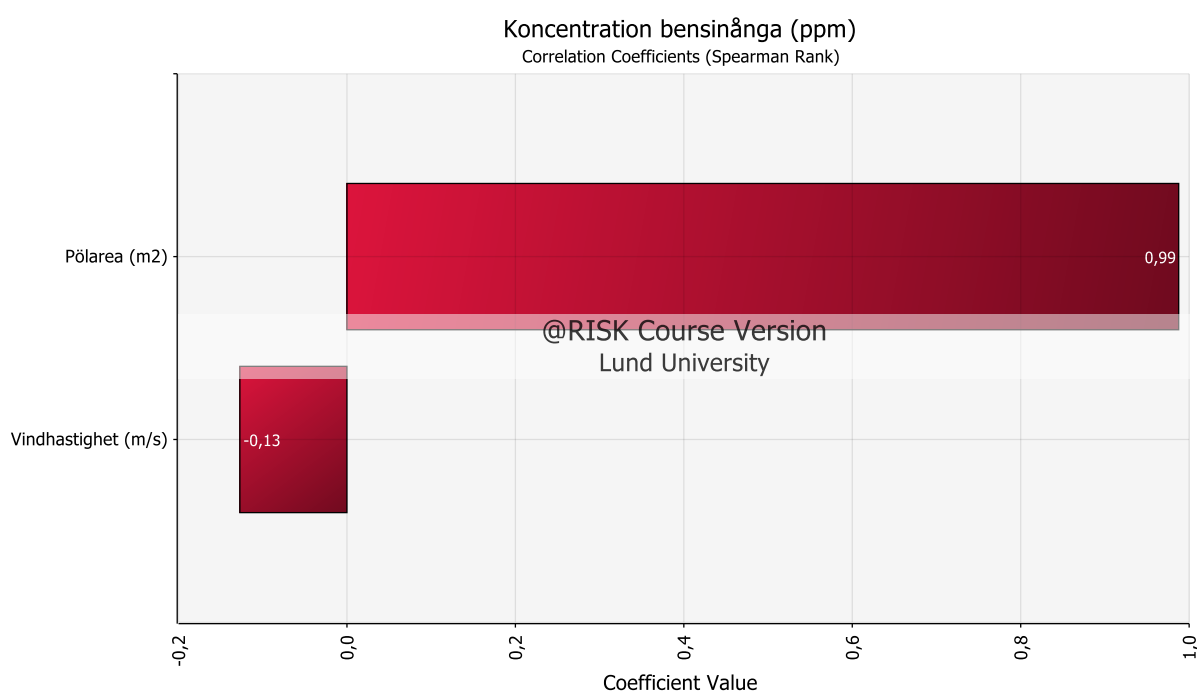
I Tabell 27 nedan redovisas resultatet av beräknad koncentration av bensenångor på olika avstånd från köl.

Tabell 27. Koncentration bensenångor i luft på 1,5 meters höjd vid olika avstånd från pöl.

Avstånd (m)	Koncentration bensenångor (ppm)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
5	171	994	2 047
10	45	276	587
15	20	127	274
20	11	73	158

Enligt MSB RIB föreligger risk för dödsfall efter 1 h exponering av 4000 ppm bensenångor. I Tabell 27 ovan framgår det att denna koncentration ej uppnås.

I Figur 17 nedan presenteras en känslighetsanalys för koncentration bensenångor (ppm) på avståndet 5 meter från pöl för stabilitetsklass B.



Figur 17. Känslighetsanalys för koncentration av bensenångor (ppm) på avståndet 5 meter för stabilitetsklass B.

5.3 Individrisk

I detta avsnitt presenteras individrisk som beräknats med indata från jämförelsestudien där osäkerheterna ingår som fördelningar. Endast riskbidragen från jetflamma, giftigt gasmoln (ämnesklass 2.3), pölbrand och BLEVE har beaktats. Det scenario som beaktas för ämnesklass 2.3 är med svaveldioxid som representativt ämne samt med stabilitetsklass B. Valet av svaveldioxid som representativt ämne gjordes eftersom detta är det som är mest vanligt förekommande i jämförelsestudien. Samma motivering gäller för val av stabilitetsklass.

De avstånd som valts för att utvärdera individrisken i detta examensarbete är 5, 35, 100 och 400 meter. Dessa avstånd valdes ut för att kunna utvärdera risknivån på ett avstånd nära och långt borta från riskkällan samt för att få en uppfattning om hur risknivån förändras

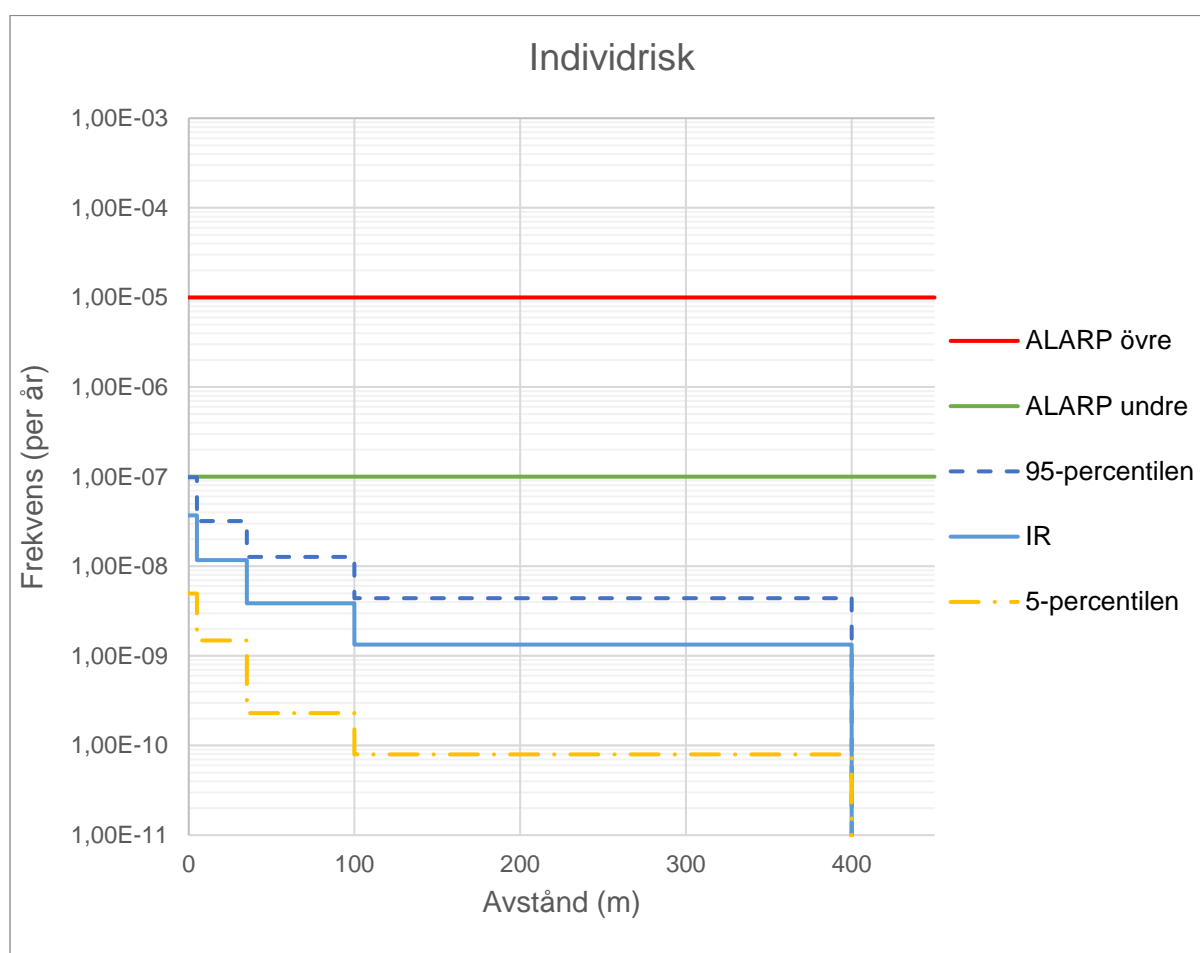
däremellan. I Tabell 28 nedan presenteras individrisken på de olika valda avstånden från väg med ett konfidensintervall på 90 %.

Tabell 28. Individrisk på olika avstånd med 90 % konfidensintervall.

Avstånd (m)	Individrisk (sannolikhet att omkomma per år)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
5	$4,96 \cdot 10^{-9}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$	$9,84 \cdot 10^{-8}$
35	$1,49 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$	$3,20 \cdot 10^{-8}$
100	$2,31 \cdot 10^{-10}$	$3,88 \cdot 10^{-9}$	$1,27 \cdot 10^{-8}$
400	$7,95 \cdot 10^{-11}$	$1,35 \cdot 10^{-9}$	$4,42 \cdot 10^{-9}$

Av de genomförda simuleringarna framgår det att individrisken varierar med upp till två tiopotenser inom ett 90 % konfidensintervall.

I Figur 18 nedan presenteras siffrorna från Tabell 28 i ett diagram som visar individrisken på olika avstånd inklusive ett konfidensintervall på 90 %. I kommande figurer presenteras även acceptanskriterier för ALARP. Detta görs för att åskådliggöra den relativa storleken mellan osäkerhetsintervallet för risknivån och intervallet mellan övre och undre gräns för ALARP.

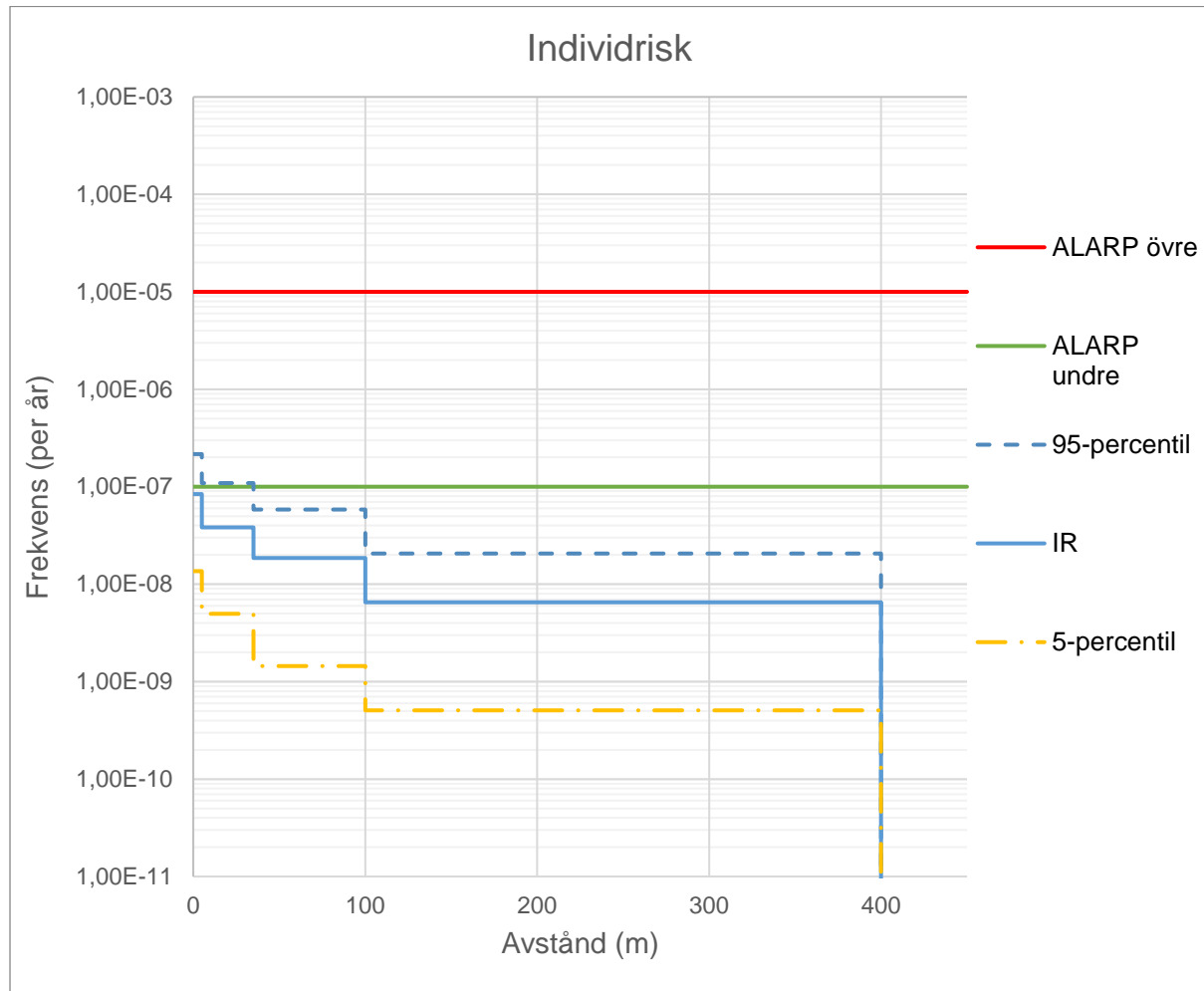


Figur 18. Individrisk på olika avstånd från väg med ett 90 % konfidensintervall markerat.

Konfidensintervallet i Figur 18 ovan härstammar från de osäkerheter som samtliga indataparametrar bidrar med. 95-percentilen för individrisken tangerar den undre gränsen för

ALARP vid 5 meters avstånd. Det observeras även att väntevärdet ligger närmre 95-percentilen än 5-percentilen.

För att undersöka vilken påverkan val av sannolikhetsfördelning har på resultatet genomfördes samma beräkning vars resultat redovisas i Figur 18 ovan, men där samtliga ingående fördelningar är triangelfördelningar i stället för PERT-fördelningar. Resultatet av detta återges i Figur 19 nedan.

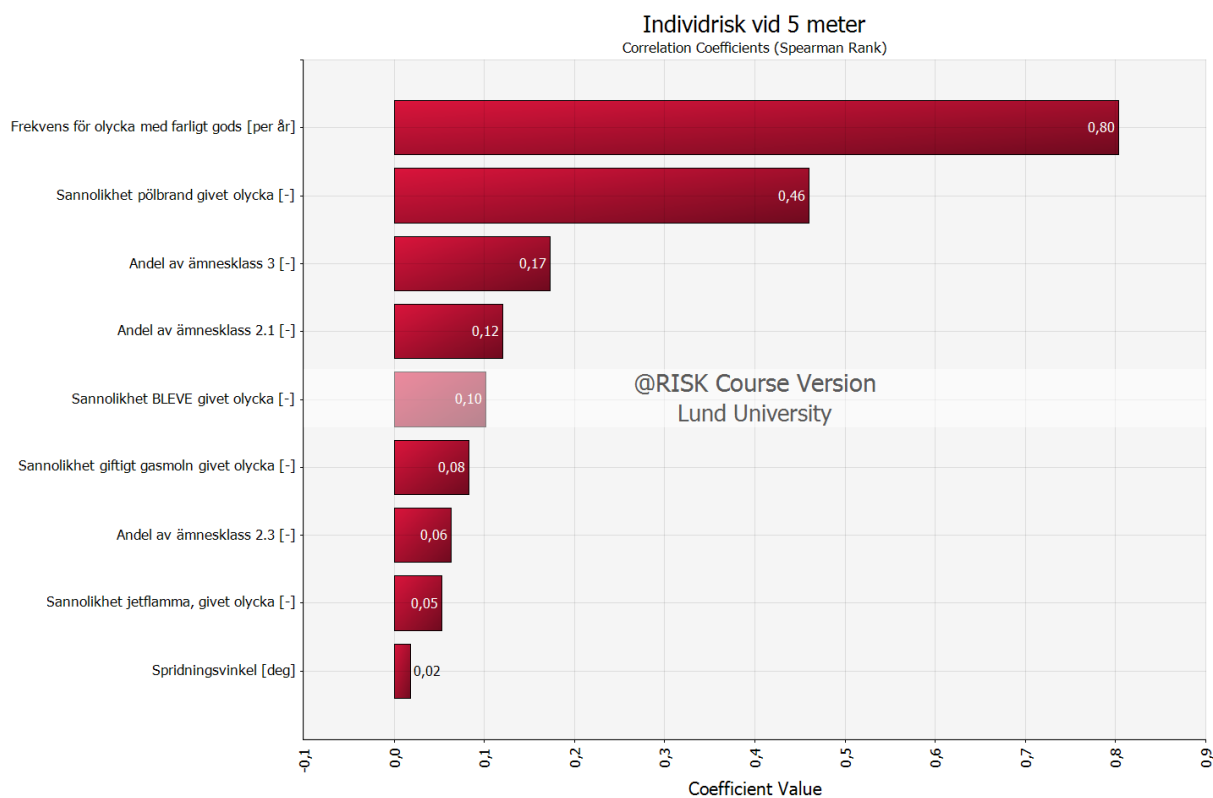


Figur 19. Individrisk på olika avstånd från väg med ett 90 % konfidensintervall markerat. Samtliga ingående parametrar utgörs i detta exempel av triangelfördelningar.

Vid användning av triangelfördelningen blev väntevärdet för individrisken högre på samtliga undersökta avstånd och det 90 % konfidensintervallet blev marginellt bredare.

Triangelfördelningen kommer inte att användas mer i detta examensarbete. Resterande presenterade resultat är beräknade med PERT-fördelningen. Resonemang kring effekten av val av fördelning förs i avsnitt 6.1.

För att undersöka vilka indataparametrar som påverkade individrisken mest genomfördes en känslighetsanalys vid de olika avstånden som valts ut. En känslighetsanalys för individrisk vid 5 meter presenteras i Figur 20 nedan.



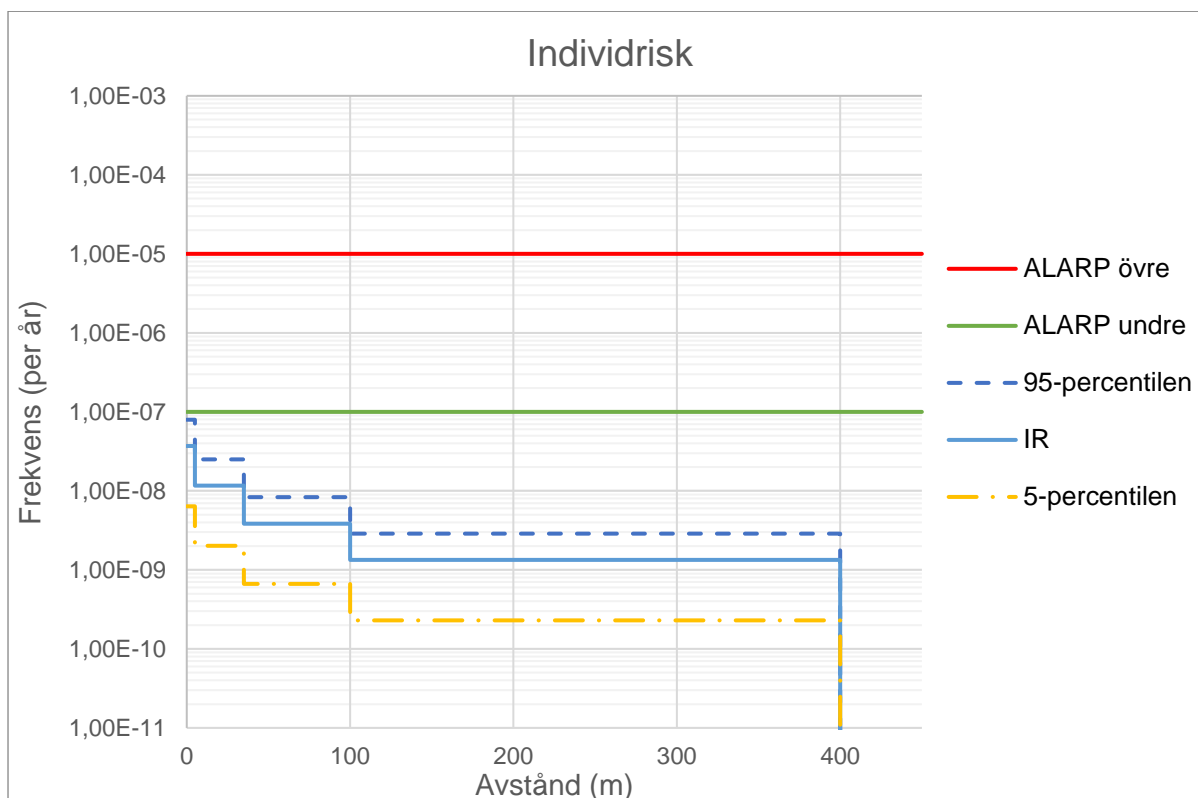
Figur 20. Känslighetsanalys för individrisk vid avståndet 5 meter från väg.

Det framgår av känslighetsanalyserna att den parameter som har störst inverkan på risknivån vid samtliga avstånd är frekvens för olycka med farligt gods. För tornadodiagram för respektive avstånd, se Bilaga B. De tre indataparametrar med störst påverkan på individrisken vid olika avstånd presenteras i Tabell 29 nedan.

Tabell 29. Rangordning av indataparametrar efter inverkan på individrisknivån vid olika avstånd. Endast de tre indataparametrar med störst påverkan på resultatet är inkluderade.

Avstånd (m)	Parameter rangordnat efter påverkan
5	Frekvens för olycka med farligt gods per år
	Sannolikhet för pölbrand givet olycka
	Andel av ämnesklass 3
35	Frekvens för olycka med farligt gods per år
	Sannolikhet för pölbrand givet olycka
	Sannolikhet för BLEVE givet olycka
100	Frekvens för olycka med farligt gods per år
	Sannolikhet för BLEVE givet olycka
	Andel av ämnesklass 2.1
400	Frekvens för olycka med farligt gods per år
	Sannolikhet för BLEVE givet olycka
	Andel av ämnesklass 2.3

För att undersöka hur osäkerheten i indataparametern frekvens för olycka med farligt gods per år påverkar risknivån beräknades individrisken med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingår som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %) och ritades upp som en individriskprofil. Resultatet av dessa beräkningar presenteras i Figur 21 nedan.



Figur 21. Effekten som indataparametern frekvens för olycka med farligt gods har på risknivån åskådliggjort i en individriskkurva vid olika avstånd.

I Figur 21 ovan utgörs konfidensintervallet endast av osäkerheterna kopplade till indataparametern frekvens för olycka med farligt gods. Väntevärdet för individrisken ligger fortfarande under nedre gränsen för ALARP för samtliga avstånd. Intervallet mellan 5-percentilen och 95-percentilen är smalare än för det intervall som uppstod när samtliga parametrar ingått med fördelningar. Dessa data presenteras även i Tabell 30 nedan.

Tabell 30. Individrisk på de olika avstånden 5, 35, 100 och 400 meter med 90 % konfidensintervall till följd av osäkerheter kring parametern frekvens för olycka med farligt gods.

Avstånd (m)	Individrisk (sannolikhet att omkomma per år)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
5	$6,38 \cdot 10^{-9}$	$3,70 \cdot 10^{-8}$	$7,96 \cdot 10^{-8}$
35	$2,02 \cdot 10^{-9}$	$1,17 \cdot 10^{-8}$	$2,52 \cdot 10^{-8}$
100	$6,65 \cdot 10^{-10}$	$3,85 \cdot 10^{-9}$	$8,30 \cdot 10^{-9}$
400	$2,30 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-9}$	$2,87 \cdot 10^{-9}$

För att undersöka hur osäkerheten i indataparametern sannolikhet för pölbrand påverkar risknivån beräknades individrisken med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingår som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %). Detta sammanställs i Tabell 31 nedan.

Tabell 31. Individrisk på de olika avstånden 5 och 35 meter med 90 % konfidensintervall till följd av osäkerheter kring parametern sannolikhet för pölbrand givet olycka.

Avstånd (m)	Individrisk (sannolikhet att omkomma per år)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
5	$1,78 \cdot 10^{-8}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$	$5,87 \cdot 10^{-8}$
35	$8,02 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$

För att undersöka hur osäkerheten i indataparametern sannolikhet för BLEVE påverkar risknivån beräknades individrisken med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingick som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %). Resultatet återges i Tabell 32 nedan.

Tabell 32. Individrisk på avstånden 100 och 400 meter med 90 % konfidensintervall till följd av osäkerheter kring parametern sannolikhet för BLEVE givet olycka.

Avstånd (m)	Individrisk (sannolikhet att omkomma per år)		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
100	$1,77 \cdot 10^{-9}$	$3,88 \cdot 10^{-9}$	$7,59 \cdot 10^{-9}$
400	$6,64 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-9}$	$2,54 \cdot 10^{-9}$

5.4 Samhällsrisk

I detta avsnitt presenteras samhällsrisk som beräknats med indata från jämförelsestudien där osäkerheterna ingår som fördelningar. Endast riskbidragen från jetflamma, giftigt gasmoln (ämnesklass 2.3), pölbrand och BLEVE har beaktats. Det scenario som beaktas för ämnesklass 2.3 är med svaveldioxid som representativt ämne samt med stabilitetsklass B. Val av representativt ämne samt stabilitetsklass motiveras med att dessa var vanligast förekommande i jämförelsestudien.

Simuleringar med de ansatta PERT-fördelningarna för indataparametrarna resulterar i att väntevärde och konfidensintervall kan tas fram för kumulativa frekvenser och antal döda för de olika slutkonsekvenserna. Dessa värden presenteras i Tabell 33 och Tabell 34 nedan.

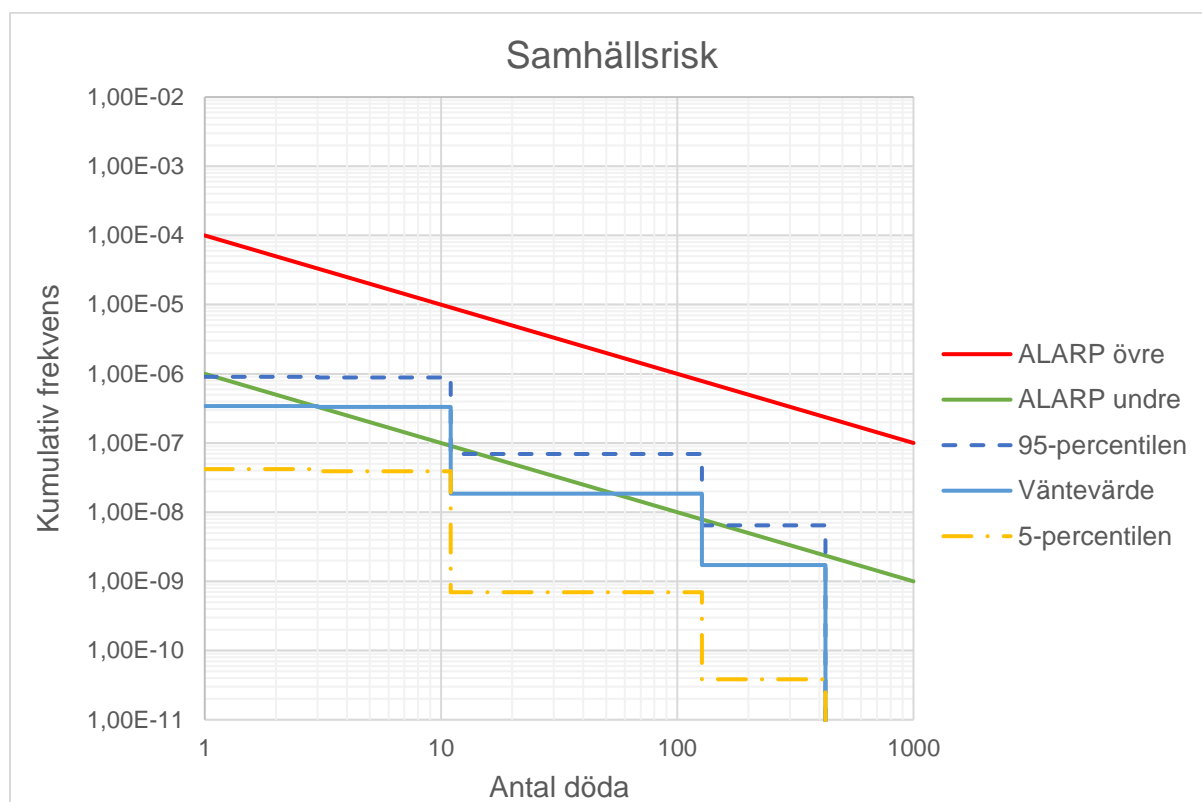
Tabell 33. Sannolikhet (kumulativ frekvens) för respektive slutkonsekvens med ett 90 % konfidensintervall.

Slutkonsekvens	Kumulativ frekvens		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
Jetflamma	$4,19 \cdot 10^{-8}$	$3,42 \cdot 10^{-7}$	$9,06 \cdot 10^{-7}$
Pölbrand	$3,90 \cdot 10^{-8}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$	$8,88 \cdot 10^{-7}$
Giftigt gasmoln	$6,97 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-8}$	$6,98 \cdot 10^{-8}$
BLEVE	$3,86 \cdot 10^{-11}$	$1,72 \cdot 10^{-9}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$

Tabell 34. Antal döda för respektive slutkonsekvens med ett 90 % konfidensintervall.

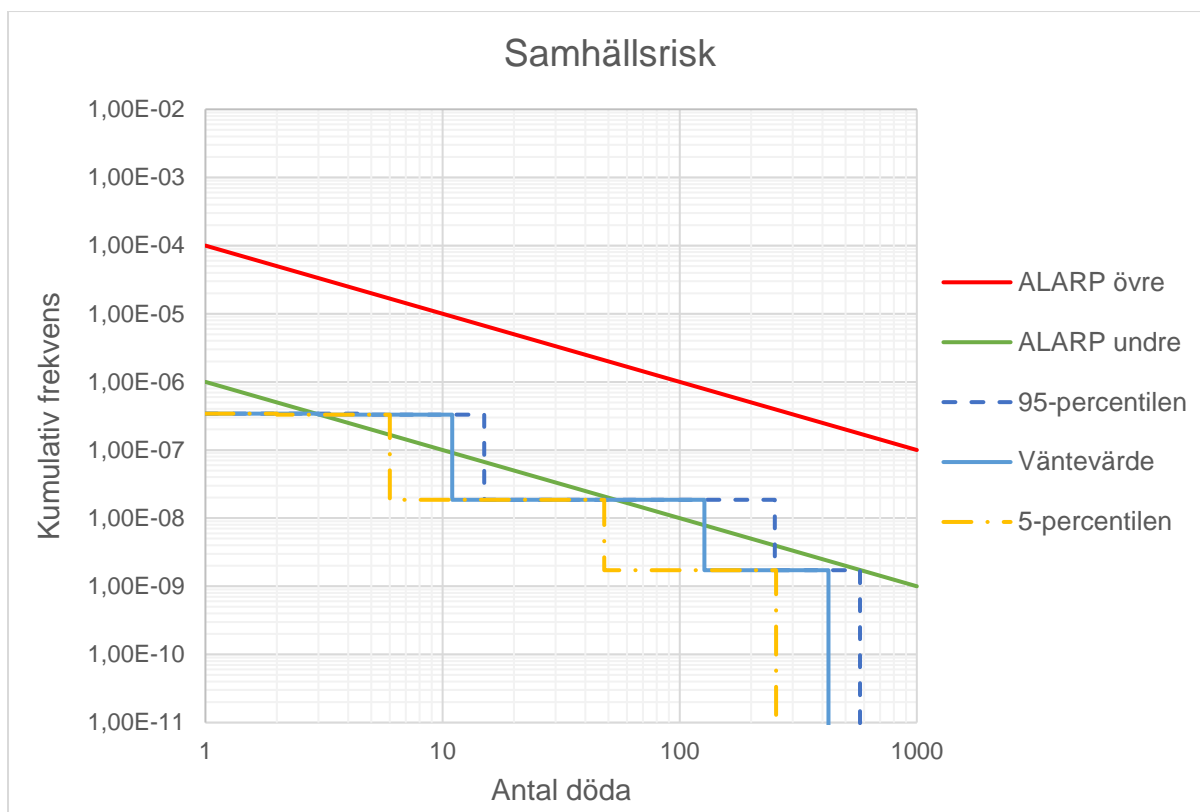
Slutkonsekvens	Antal döda		
	Nedre gräns (90 % konfidens)	Väntevärde	Övre gräns (90 % konfidens)
Jetflamma	2	3	5
Pölbrand	6	11	15
Giftigt gasmoln	48	127	252
BLEVE	255	424	576

Dessa värden ritas upp i F/N-kurvor för att illustrera risknivåernas relation till ALARP-området. I Figur 22 nedan presenteras den beräknade samhällsrisk i en F/N-kurva med ett konfidensintervall på 90 % för frekvensen.



Figur 22. Samhällsrisk i form av en F/N-kurva inklusive ett konfidensintervall på 90 % för frekvensen.

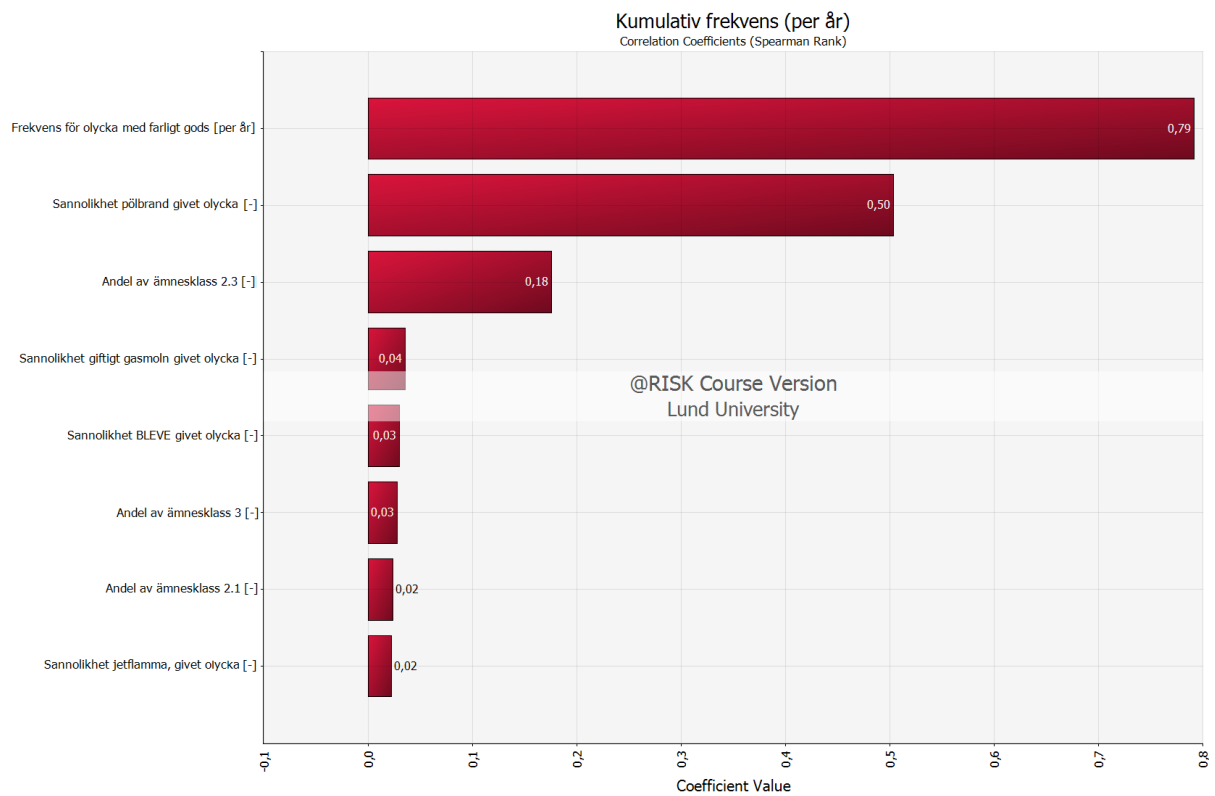
I Figur 23 nedan presenteras den beräknade samhällsrisk med ett konfidensintervall på 90 % för antal döda.



Figur 23. Samhällsrisk i form av en F/N-kurva inklusive ett konfidensintervall på 90 % för antal döda.

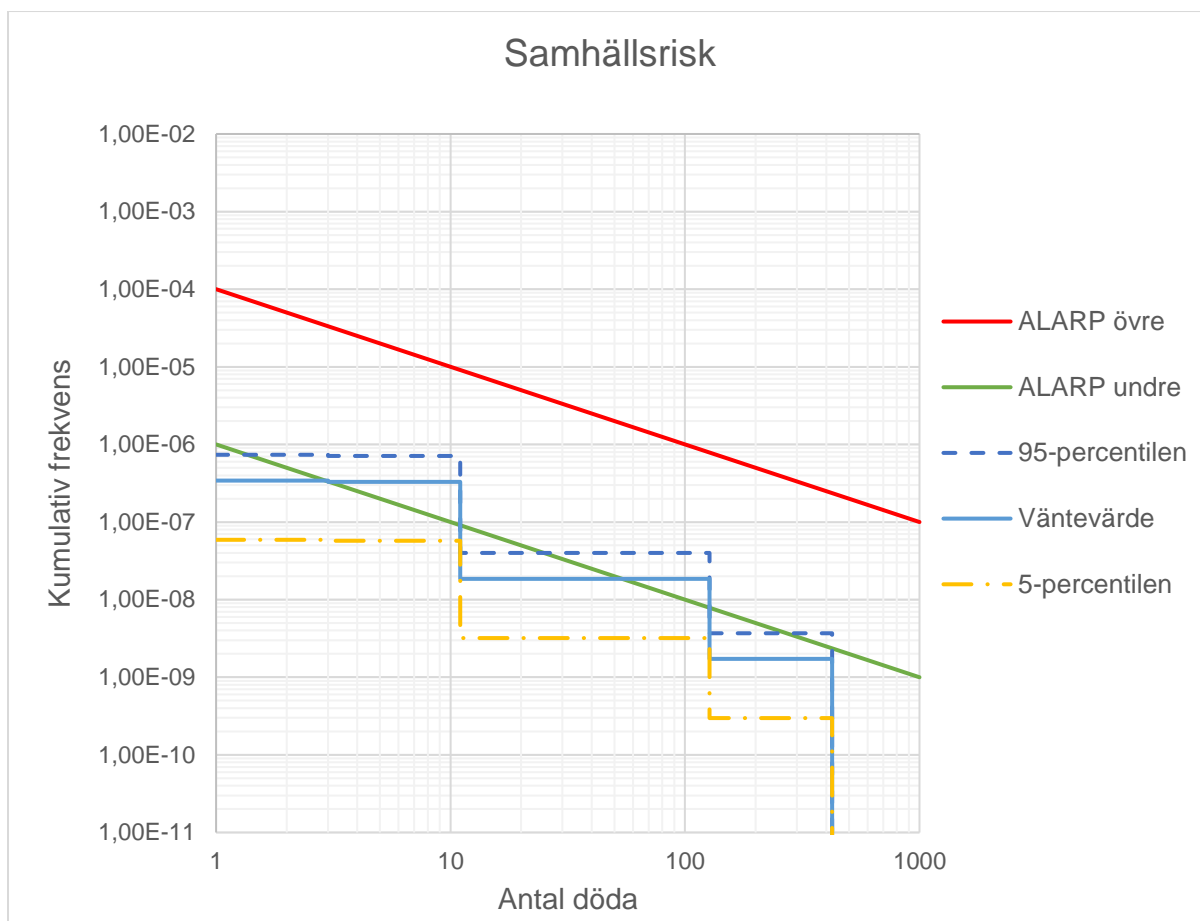
Väntevärdet för samhällsrisk varierar mellan att vara acceptabelt och tolerabelt. Observera att bidraget till samhällsrisk från jetflamma är svår att urskilja i grafen på grund av att jetflammans bidrag till den ackumulerade frekvensen jämförelsevis är litet.

I Figur 24 nedan återges en känslighetsanalys för den kumulativa frekvensen i samhällsrisk.



Figur 24. Känslighetsanalys för den kumulativa frekvensen i samhällsrisk.

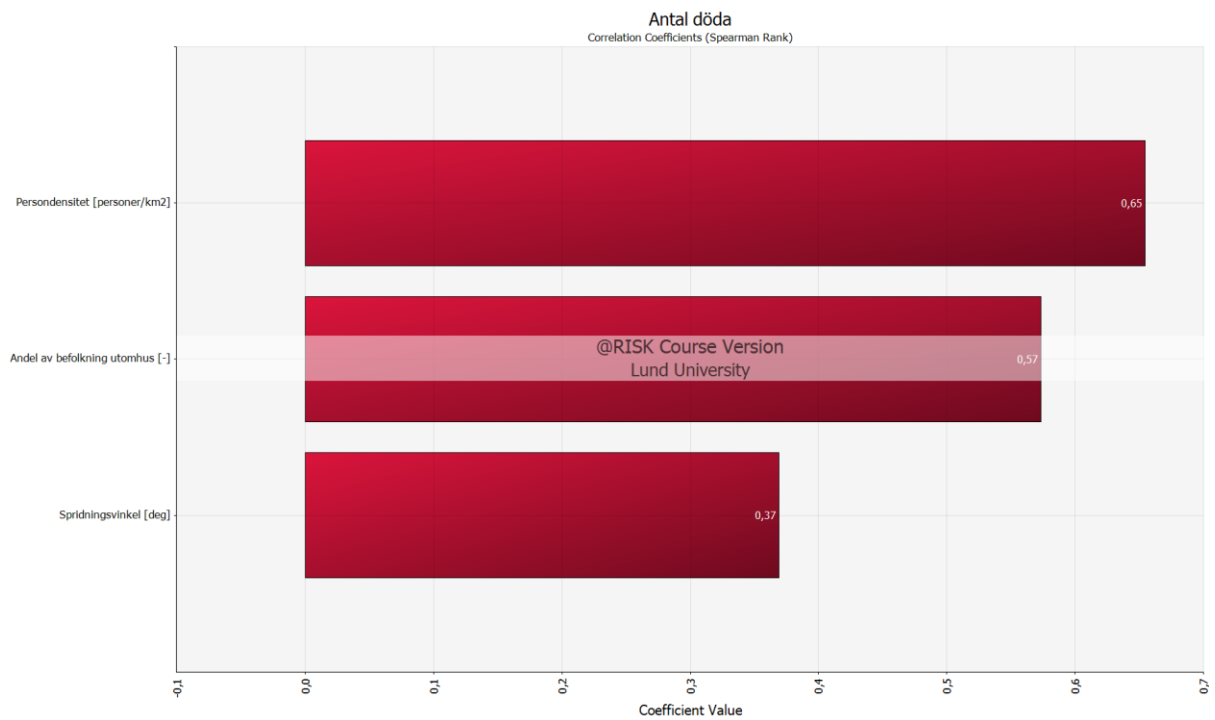
Den indataparameter som har störst inverkan på den kumulativa frekvensen i samhällsrisk är frekvens för olycka med farligt gods. För att undersöka denna indataparameters effekt på risknivån beräknades samhällsrisk med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingår som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %) och plottades i en F/N-kurva. Resultatet av dessa beräkningar presenteras i Figur 25 nedan.



Figur 25. Effekten på risknivån som indataparametern frekvens för olycka med farligt gods har på riskbilden åskådliggörs i en F/N-kurva.

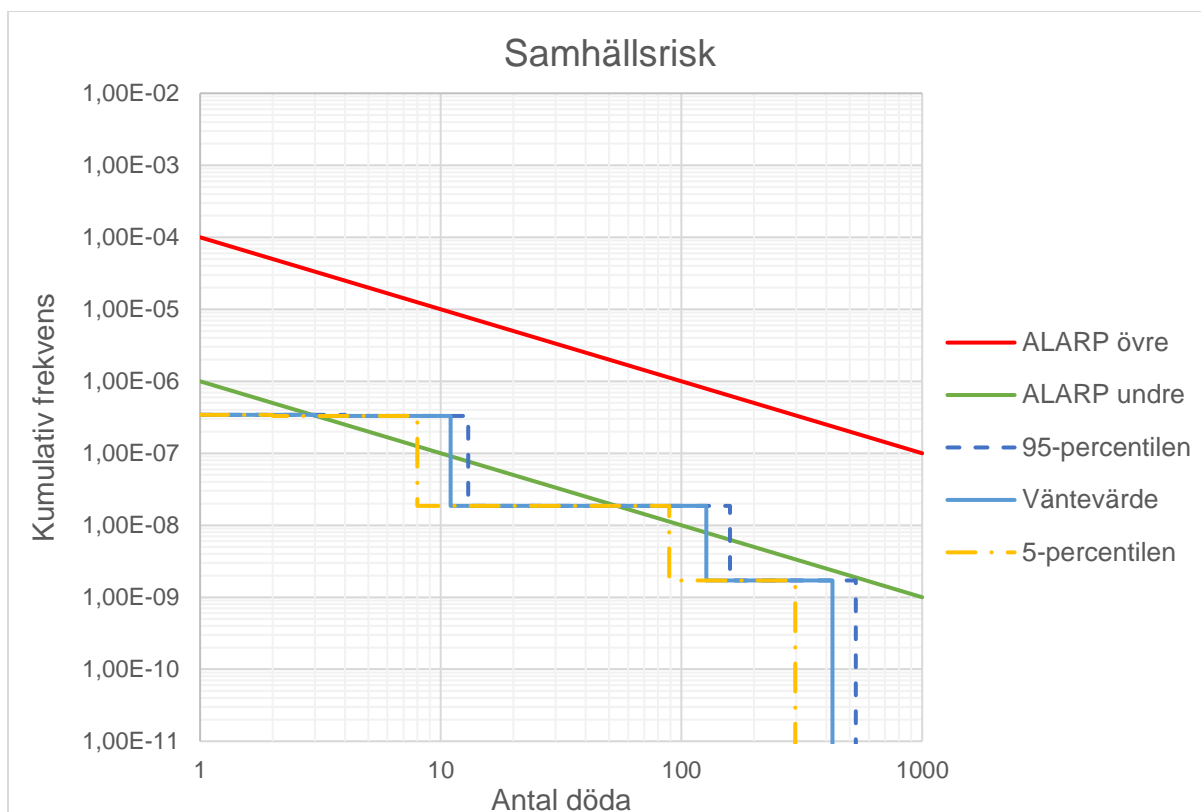
I Figur 25 ovan utgörs konfidensintervallet endast av osäkerheterna som emanerar från indataparametern frekvens för olycka med farligt gods. I jämförelse med Figur 22 har intervallet mellan 5-percentilen och 95-percentilen blivit smalare.

I Figur 26 nedan presenteras en känslighetsanalys över antal döda i samhällsrisken.



Figur 26. Känslighetsanalys för antal döda vid beräkning av samhällsrisken.

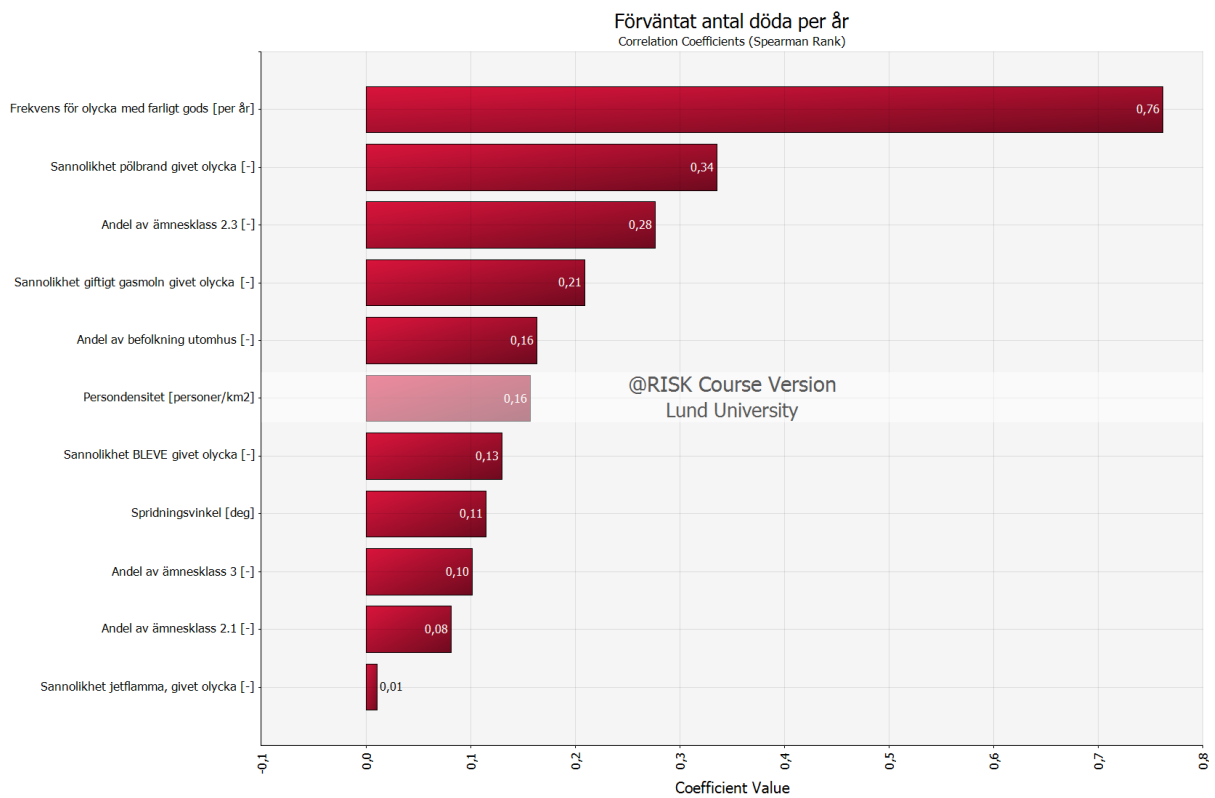
Den indataparameter som har störst inverkan på antal döda i samhällsrisken är persontäthet (personer/km²). För att undersöka denna indataparameters effekt på risknivån beräknades samhällsrisken med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingår som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %) och plottades i en F/N-kurva. Resultatet av dessa beräkningar presenteras i Figur 27 nedan.



Figur 27. Effekten på risknivån som indataparametern persontäthet har på riskbilden åskådliggörs i en F/N-kurva

I Figur 27 ovan utgörs konfidensintervallet endast av osäkerheterna kopplade till indataparametern persontäthet. I jämförelse med Figur 23 har intervallet mellan 5-percentilen och 95-percentilen blivit smalare.

Samhällsrisk, förväntat antal döda per år, beräknades och dess väntevärde blev $6,31 \cdot 10^{-6}$ med ett minimi- och maximivärde på $7,06 \cdot 10^{-7}$ respektive $1,74 \cdot 10^{-5}$ med 90 % konfidens. Detta motsvarar att en person dör ungefär varje 160 000 år. Detta riskmått är en kombination av frekvensen för undersökta slutkonsekvenser samt antal döda för respektive slutkonsekvens. En känslighetsanalys för förväntat antal döda illustreras i Figur 28 nedan.



Figur 28. Känslighetsanalys av förväntat antal döda (per år).

Den indataparameter som har störst inverkan på förväntat antal döda per år är frekvens för olycka med farligt gods.

6 Diskussion

De antaganden som görs om indataparametrar i riskutredningar har redogjorts för främst i avsnitt 4 och sedan sammanställts i avsnitt 5 av detta examensarbete. I detta avsnitt diskuteras resultaten som erhöles i avsnitt 5.

Det förekommer stora platsspecifika skillnader kopplade till de olika parametrarna. Vidare kan det konstateras att det förekommer stor variation kring antaganden i riskutredningar. I vissa fall kan detta bero på att kunskapen är bristfällig om de olika parametrar som används i beräkningar som genomförs i riskutredningarna. I andra fall kan dåligt underbyggda antaganden bero på bristande resurser.

En teori presenterades av Alvarsson & Jansson (2016: 70) om att frekvens för olycka med farligt gods är den parameter som potentiellt kan orsaka störst skillnader i resultat. Resultatet av kvantifieringen som genomförts i detta examensarbete stödjer denna teori. Det visade sig att denna parameter hade störst inverkan på individrisken vid samtliga undersökta avstånd samt för samhällsrisk, förväntat antal döda per år. Det bör nämnas att frekvens för olycka egentligen ej är en indataparameter utan beräknas baserat på ett antal faktorer.

För att jämföra resultatet i detta examensarbete med tidigare studier kan en artikel av Goerlandt, Khakzad & Reniers (2017) nämnas. I artikeln uppges att elva aktörer genomförde separata riskanalyser på en referensanläggning som förvarade ammoniak. Resultaten av dessa utredningar varierade i regel med en till två tiopotenser med enskilda variationer på upp till fyra tiopotenser (Amendola et al. 1992, i Goerlandt, Khakzad & Reniers, 2017). Detta indikerar att än idag, nästan 30 år senare, föreligger liknande problematik kring varierande resultat i riskutredningar till följd av osäkerheter och antaganden. Vidare menar författarna att det är omöjligt att empiriskt avgöra riktigheten i en kvantitativ riskutredning.

Det är möjligt att minska variationen mellan olika riskutredningars resultat genom att implementera användningen av ett standardiserat verktyg för QRA, såsom exempelvis det som används inom kemikalieindustrin i Nederländerna (Goerlandt, Khakzad & Reniers, 2017). I Nederländerna är en särskild modell (SAFETI-NL) lagstadgad för somliga verksamhetsområden. Syftet är att minska variationen i resultat mellan riskanalyser. Modellen innehåller förenklade och standardiserade scenarier. På detta sätt minimeras den enskilde riskutredarens inflytande på resultatet. Ur ett juridiskt perspektiv kan implementering av en sådan modell anses vara positivt (Pasman et al., 2009). Det hade varit möjligt att implementera ett liknande system i Sverige. Redan idag finns riktlinjer i form av exempelvis RIKTSAM. En negativ aspekt som lyfts av Pasman et al. (2009) är emellertid att modellen inte uppdateras i samma takt som exempelvis framsteg inom IT och datateknologi.

6.1 Behandling av indataparametrar

Vid behandling av indataparametrar har ingen distinktion gjorts mellan aleatorisk och epistemisk osäkerhet. Skillnaden har emellertid noterats för varje parameter, se avsnitt 4.1. Den parameter som har störst inverkan på resultatet, frekvens för olycka med farligt gods, bedöms vara en platsspecifik parameter. Detta innebär att den osäkerhet som observeras för denna parameter sannolikt kan härledas till naturlig variation.

Under förutsättningen att varje enskild riskutredning baseras på tillförlitlig information kommer den epistemiska osäkerheten att vara begränsad för indataparametrar vars variation beror på denna typ av osäkerhet. I sådana fall hade platsspecifika parametrar därför varit ointressanta att studera vidare här. I praktiken är det dock osannolikt att tillförlitlig information finns för dessa parametrar i samtliga fall. Därmed är det av intresse att inkludera platsspecifika parametrar i känslighetsanalysen. Detta ger en indikation på indataparametrarnas inbördes rangordning i effekt på resultatet. För de platsspecifika parametrarna erhålls även ett mått på deras överst möjliga placering i känslighetsanalysen eftersom dessa parametrar hade varit mindre osäkra i en platsspecifik tillämpning. Eftersom indataparametern frekvens för olycka med farligt gods hamnar högst upp i tornadodiagrammet anses den därför vara prioriterad att undersökas närmare vid utförande av framtida riskutredningar.

I examensarbetet kontrollerades effekten som valet av sannolikhetsfördelningar för indataparametrarna har på riskmättet individrisk. Detta gjordes genom att ersätta indataparametrarnas PERT-fördelningar med triangelfördelningar. Byte till triangelfördelningar medförde att väntevärdet steg på samtliga undersökta avstånd i jämförelse med motsvarande PERT-fördelningar. Detta kan förklaras genom att PERT-fördelningen inte är lika känslig för ytterlighetsfall som triangelfördelningen är. Maxvärden för somliga parametrar har troligen blivit konservativt antagna av konsultbolagen. Triangelfördelningen lägger större vikt vid dessa värden i förhållande till vad PERT-fördelningen gör, vilket i förlängningen resulterar i att väntevärdet ökar vid användningen av triangelfördelningar. Konfidensintervallet blev marginellt bredare vid användning av triangelfördelning i jämförelse med PERT-fördelning. Detta kan förklaras genom att mindre vikt läggs vid typvärdet för triangelfördelningen, vilket genererar en större spridning i dessa fördelningar. PERT-fördelningens effekt på resultatet, i jämförelse med triangelfördelningens, är således att konfidensintervallet komprimeras.

Sammanfattningsvis går det att konstatera att det finns flertalet andra sannolikhetsfördelningar som går att applicera på det data som erhållits från jämförelsestudien. Alternativt hade olika parametrar kunnat tillskrivas olika fördelningar. Genom att använda andra typer av sannolikhetsfördelningar erhålls olika resultat, vilket illustrerats genom att undersöka triangelfördelningens effekt. Enligt resonemanget i avsnitt 3.2 valdes PERT-fördelningen som huvudsaklig sannolikhetsfördelning att tillämpa på de indataparametrar som behandlas i examensarbetet.

6.2 Konsekvensberäkningar

I detta skede beräknades konsekvensavstånden med utgångspunkt i Fischer et al. (1998). Därefter användes väntevärdena för dessa avstånd för respektive slutkonsekvens i efterföljande beräkningar. Således beaktades inte respektive konsekvensavstånds konfidensintervall, och därmed osäkerhet, i efterföljande resultat. Denna avgränsning erfordrades av flera skäl.

För slutkonsekvenserna jetflamma och BLEVE användes simuleringsprogrammet ALOHA för att fastställa värmestrålningens omfattning. Övergången från handberäkningar med

Fischer et al. (1998) till simuleringar i ALOHA omöjliggjorde att på ett rimligt sätt förmedla osäkerheterna. Således kunde informationen kring osäkerheter inte förmedlas vidare efter detta förfarande för dessa slutkonsekvenser. För att upprätthålla någorlunda stringent behandling av övriga slutkonsekvenser valdes att bortse även från deras osäkerheter kring konsekvensavstånd och istället endast använda väntevärdet i efterföljande delar av examensarbetet. För somliga slutkonsekvenser, till exempel BLEVE, finns det inte fördelningar som interagerar med varandra vid beräkningarna på grund av ekvationens konstruktion. Således hade resultatet blivit detsamma oaktat om väntevärdet från PERT-fördelningen eller själva PERT-fördelningen i sig användes som ingångsvärde.

Vidare saknades information kring ett stort antal parametrar i jämförelsestudien som ingick i ekvationerna i Fischer et al. (1998). Detta påbjöd att externa källor användes vilket rimligen försvagar resultatets förankring till jämförelsestudien. Således hade det varit missvisande att låta osäkerheter från dessa beräkningar fortplantas i efterkommande delar.

6.2.1 BLEVE

Väntevärdet för eldklotsdiametern hos en BLEVE beräknades till 194 m med ett 90 % konfidensintervall på 181 m och 209 m som undre respektive övre gräns. Endast en fördelning ingick i denna beräkning vilket gör att en känslighetsanalys blir utan mening. Därefter övergick beräkningen av konsekvensavstånd till ALOHA och information kring osäkerheter förlorades enligt resonemanget tidigare i detta avsnitt. Fischer et al. (1998) skriver att egenskaperna för en BLEVE har undersökts teoretiskt och experimentellt. Det vanligaste sambandet mellan eldklotsdiameter och bränslemassan är det som presenteras i Ekvation 5 i avsnitt 5.2.1.1. Emellertid kan konstanterna, 6,5 och 1/3 variera signifikant. Detta beror på att sambandet baseras på olika ämnen, temperaturer och på experiment i varierande skala. Fischer et al. (1998) konstaterar att konstanten 6,5 överensstämmer med flertalet referenser och att konstanten 1/3 grundar sig på en analys genomförd av Baker et al. (1983).

6.2.2 Jetflamma

Väntevärdet på längden för en jetflamma beräknades till 11 meter med undre och övre gräns (90 % konfidens) på 2 meter respektive 21 meter. Känslighetsanalysen visade att hålarea var den parameter som hade störst inverkan på flamlängden. Denna osäkerhet bedöms till största del vara aleatorisk vilken försvårar möjligheten att reducera den, men indikerar vikten av att modellera den väl.

6.2.3 Giftigt gasmoln

Vid beräkning av giftigt gasmoln (ämnesklass 2.3) erhöles olika konsekvensavstånd beroende på om ammoniak eller svaveldioxid används som representativt ämne. Detta är en följd av skillnader i ämnens fysikaliska egenskaper och toxicitet. Därutöver observerades oklarheter i skadekriterier kopplade till denna slutkonsekvens i jämförelsestudien. De skadekriterier som slutligen användes erhöles från MSB RIB, men även dessa var vagt definierade. Dessa faktorer bidrog med osäkerheter som sannolikt inte förmedlades fullgott i efterföljande resultat.

Flera riskutredningar i jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) hänvisade till *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor* utgiven av Försvarets forskningsanstalt (FOA) vid beräkning av spridning av gas. Modellerna för gasutströmning som presenteras i FOA bygger på antagandena att gasen uppfyller lagarna för en ideal gas och att alla strömningsförlopp är adiabatiska (Fischer et al, 1998: 66). Antagandet om adiabatiskt förlopp, alltså att värmeutbytet mellan gasen och omgivningen försummas, motiveras emellertid med att det har visat sig vara en uppskattning med hög riktighet. Sammantaget kan det emellertid konstateras att denna matematiska modell, liksom alla andra, är byggd på antaganden och förenklingar av verkligheten.

Känslighetsanalysen påvisade att källstyrkan var den parameter som påverkade koncentrationen svaveldioxid mest. Detta gällde för samtliga undersökta avstånd. Källstyrkan är, som tidigare nämnt, egentligen inte en indataparameter utan beräknas vanligen baserat på andra parametrar. Detta förfarande genomfördes för slutkonsekvensen jetflamma och redogörs för i avsnitt 5.2.1.2. En känslighetsanalys för källstyrkan visade att håldiametern var den viktigaste parametern. Ekvationen för källstyrka i Fischer et al. (1998) är densamma vid beräkningar kring jetflamma och giftigt gasmoln. Baserat på detta är håldiametern den viktigaste parametern även för koncentration svaveldioxid på olika avstånd från utsläppskällan.

6.2.4 Pölbrand

Väntevärdet för flammhöjden beräknades till 16 m med ett 90 % konfidensintervall mellan 8 m och 23 m som undre respektive övre gräns. Denna osäkerhet förmedlades emellertid inte vidare efter att beräkning av konsekvensavstånd övergick till ALOHA. Vid beräkning av flammhöjden är det endast en variabel som utgörs av en fördelning. Detta medför att en känslighetsanalys är redundant. Den variation i indataparametern pöldiameter som observerades i jämförelsestudien bedöms bero på aleatorisk osäkerhet.

Enligt Alvarsson & Jansson (2016: 41) varierar den sannolikhet som tillskrivs olika pölstorlekar mycket och baseras på rena antaganden och utan hänvisning till vetenskaplig litteratur. Detta exemplifierar svårigheterna med att minska osäkerheterna kring somliga indataparametrar.

6.3 Individrisk

Vid beräkning av individrisk medförde osäkerheterna i indataparametrarna att resultatet varierade med upp till två tiopotenser inom ett 90 % konfidensintervall. I detta examensarbete visade resultatet att även 95-percentilen för individrisk låg under ALARP-området på samtliga undersökta avstånd. Emellertid beaktades endast ett begränsat antal slutkonsekvenser på grund av avgränsningar och bristfälligt underlag. Om fler slutkonsekvenser hade beaktats är det sannolikt att individriskprofilen och dess konfidensintervall hade förändrats. Detta hade exempelvis kunnat innebära att väntevärdet hamnat inom ALARP-området medan 5- och 95-percentilen hamnat utanför ALARP-området. Det som är värt att notera är konfidensintervallens bredd, snarare än dess placering i grafen. Detta gäller även för samhällsrisk.

Med nuvarande fördelningar varierar individrisken till följd av indataparametrarnas osäkerheter med ca två tiopotenser, vilket innebär att dessa osäkerheter kan påverka en riskutrednings slutsats. Beräknade risknivåer kan missvisande konstateras vara acceptabla när de med andra antaganden hade bedömts vara tolerabla. I praktiken innebär denna skillnad att det i det första fallet inte krävs några riskreducerande åtgärder medan det i det andra fallet krävs riskreducerande åtgärder inom rimliga gränser. Analogivis hade risknivåerna i ett fall kunnat beräknas till att vara tolerabla medan andra antaganden kunnat resultera i att risknivåerna blivit oacceptabla. I praktiken innebär denna skillnad att det i det första fallet krävs riskreducerande åtgärder inom rimliga gränser medan det i det andra fallet krävs riskreducerande åtgärder för att kunna fortsätta med den planerade förändringen.

Effekten på resultatet som varje enskild parameter bidrar med är relativt liten. Då effekten av osäkerheten som emanerar från indataparametern sannolikhet för olycka givet pölbrand undersöktes kunde en drygt tredubbel skillnad i resultat påvisas inom ett 90 % konfidensintervall. Då effekten av osäkerheten kopplad till indataparametern sannolikhet för BLEVE undersöktes kunde en drygt fyrdubbel skillnad påvisas inom ett 90 % konfidensintervall. Detta kan jämföras med den effekt på resultatet som uppnås då osäkerheterna i samtliga indataparametrar inkluderas, vilket uppgår till närmare två tiopotenser.

Den variation som osäkerheterna ger upphov till i resultatet påvisar att en framräknad acceptabel risknivå inte alltid med säkerhet verkligen är acceptabel. Detta påbjuder inte nödvändigtvis att acceptanskriterierna bör ändras. Däremot kan det vara en användbart att undersöka var 95-percentilen befinner sig i förhållande till ALARP-området när osäkerheter beaktas. I de fall 95-percentilen understiger den undre gränsen för ALARP-området kan det ge en indikation på att det inte behöver inhämtas mer information om indataparametrarna som givit upphov till dessa resultat. I de fall där väntevärdet hamnar inom ALARP-området medan 95-percentilen hamnar ovanför området kan detta i stället ge en indikation på att mer information om indataparametrarna bör inhämtas för att försäkra sig om att oacceptabla risker ej uppnås.

6.4 Samhällsrisk

Vid framtagning av konfidensintervall undersöktes först osäkerheten i den kumulativa frekvensen och därefter osäkerheten i antal döda. Dessa konfidensintervall ritades sedan upp i F/N-kurvor för att undersöka deras förhållande till väntevärdet.

Den kumulativa frekvensen varierade med ca två tiopotenser inom ett 90 % konfidensintervall. Med samma resonemang som för individrisken kan således olika antaganden resultera i olika slutsatser för en riskutredning.

Samhällsrisken, förväntat antal döda (per år), varierade med ca två tiopotenser inom ett 90 % konfidensintervall till följd av de osäkerheter som ingick i fördelningarna för indataparametrarna. Denna variation förmedlas i F/N-kurvorna i avsnitt 5.4. Gällande slutkonsekvensen BLEVE hamnade väntevärdet för risknivån under ALARP-området. 95-percentilen hamnade emellertid inom ALARP-området. Baserat på väntevärdet är denna risk acceptabel, men baserat på 95-percentilen är den tolerabel. I praktiken innebär detta att

olika slutsatser dras till följd av olika antaganden. Eftersom endast ett begränsat antal slutkonsekvenser beaktas är det numeriska värde som beräknats mindre relevant än omfattningen av konfidensintervallet. Om fler slutkonsekvenser hade beaktats är det sannolikt att F/N-kurvan och dess konfidensintervall hade förändrats i sin utformning och placering.

Känslighetsanalysen visar att de parametrar vars osäkerhet påverkar samhällsrisken, förväntat antal döda, mest är frekvens för olycka med farligt gods, sannolikhet för pölbrand givet olycka samt andel av ämnesklass 2.3.

6.5 Osäkerheter och felkällor

En övergripande begränsning i detta examensarbete är att jämförelsestudien av Alvarsson & Jansson (2016) endast behandlat 14 riskutredningar. Eftersom detta är ett relativt litet urval blir även slutsatserna som dras i detta examensarbete statistiskt osäkra. Utöver detta hade Alvarsson & Jansson (2016) ett antal kriterier vid val av riskutredningarna, vilket gör urvalet mindre randomiserat och därmed inte helt representativt för det totala antal riskutredningar som finns tillgängliga.

För somliga indataparametrar gjordes en punktskattning på grund av det begränsade underlag som fanns i jämförelsestudien. Att det inte finns någon osäkerhet för dessa parametrar speglar sällan verkligheten utan härstammar från att många riskutredningar ej angav information kring dessa parametrar i tillräckligt detaljerad utsträckning alternativt angav samma värde baserat på samma källa. Följaktligen blir dessa punktskattningar en förenkling av verkligheten och denna förenkling påverkar resultatet i form av att osäkerhetsintervallet förändras. Det är även sannolikt att beräkningsmodeller som inte återfinns i Fischer et al. (1998) har använts i flera riskutredningar. I dessa fall är det rimligt att somliga eftersökta indataparametrar inte förekommer, såsom exempelvis Poissons kvot och kontraktionsfaktor. Vidare är det möjligt att författarna av jämförelsestudien har valt bort att förmedla detaljer kring somliga indataparametrar. Det ska påpekas att författarna av föreliggande examensarbete ej har haft tillgång till de enskilda riskutredningarna som ingick i jämförelsestudien. Informationen kring indataparametrarna som används i detta examensarbete är således begränsad till den information som författarna till jämförelsestudien har valt att förmedla.

En möjlig felkälla i detta examensarbete är att olika riskutredningar hämtar information från samma källa såsom RIKTSAM eller beräknar olika indataparametrar med samma modell såsom VTI-modellen. Utöver detta är det inte otänkbart att riskutredare utgår från ansatta värden i tidigare genomförda riskutredningar, vilket skulle kunna vara en källa till systematisk fortplantning av fel. Denna potentiella faktor har ej beaktats i detta examensarbete.

För att adressera den indataparameter som enligt detta examensarbets resultat hade störst påverkan på riskbildningen kan VTI-modellen nämnas. Denna modell används i stor utsträckning i riskanalyser för att fastställa frekvens för olycka med farligt gods. Ardin & Markselius (2016) konstaterar att mycket har hänt inom trafiksäkerhetsområdet sedan modellen skapades. Vidare innehåller modellen förenklingar och antaganden som rimligen kan revideras i enlighet med de nya framsteg som skett inom trafiksäkerhetsområdet. Detta är eventuellt en

långsiktig lösning för att minska osäkerheterna, vilket skulle kunna bidra till bättre underbyggda antaganden.

Osäkerheter och felkällor kopplade till konsekvensberäkningar som genomförts i examensarbetet behandlas främst i avsnitt 6.2 ovan. Vid presentation av samhällsrisk i form av F/N-kurvor (se Figur 22 och Figur 23) separerades de osäkerheter som påverkar kumulativ frekvens respektive antal döda. Anledningen till detta har beräkningstekniska förklaringar. Enligt metodiken som användes beräknades dessa resultat ut var för sig. Det hade varit möjligt att kombinera osäkerheterna för att presentera dessa, men det hade inneburit en överskattning av osäkerheten. Vid konstruktion av F/N-kurvor beräknas x- respektive y-värden var för sig. När det ena beräknas hålls det andra konstant med sina väntevärden bland indataparametrarna. Om dessa resultat sammanfogas i samma graf kommer en överskattning av osäkerheterna att förmedlas.

Vid val av skadekriterier för giftigt gasmoln användes MSB RIB som källa. Här angavs vid vilken koncentration (ppm) risk för dödsfall föreligger inom 10 minuter. I jämförelsestudien angavs skadekriterier i form av värden för LC_{50} . Emellertid angavs ingen information om vilken exponeringstid dessa koncentrationer avsåg, vilket innebar att värdena ej var jämförbara. På grund av detta kunde skadekriterierna för giftigt gasmoln från jämförelsestudien ej användas. De värden för LC_{50} som angavs i jämförelsestudien var betydligt högre än den koncentration MSB RIB angav som risk för dödsfall inom 10 minuter. Genom att använda denna koncentration kan således konsekvenser av slutkonsekvensen giftigt gasmoln ha överskattats.

Den osäkerhet som påvisats i detta examensarbete härstammar inte nödvändigtvis från osäkerhet i indataparametrarna. Osäkerhetsintervallen förmedlar endast den variation som föreligger i de riskutredningar som ingår i jämförelsestudien, vilken kan ha olika orsaker. I detta examensarbete har ingen hänsyn tagits till eventuell varierande kvalitet bland de undersökta riskutredningarna. Det är möjligt att somliga riskutredningar/angivna värden i riskutredningar är bättre underbyggda än andra. Samtliga värden har emellertid behandlats på samma sätt i detta examensarbete oaktat deras eventuella skillnader i validitet och riktighet.

Val av matematiska beräkningsmodeller vid undersökning av slutkonsekvenser är en faktor som bedöms ha stor inverkan på erhållna resultat. Detta har konstaterats och berörts bland annat i avsnitten 2.3.3, 2.5.1 samt 5.2.1.2 men är dock inget som beaktats vid utförandet av detta examensarbete. Val av beräkningsmodell fastställdes i ett tidigt skede och de osäkerheter som detta medför har således rimligen propagerat genom examensarbetet. Inget försök till att kvantifiera effekten av modellosäkerhet har gjorts. Detta bedöms vara en så pass omfattande uppgift att det ligger utanför ramen för föreliggande examensarbete. Däremot anses det vara av sådan dignitet att framtida studier, förslagsvis i form av ett examensarbete, rekommenderas.

7 Slutsats

I detta avsnitt återkopplas till de frågeställningar som examensarbetet syftade till att besvara. Frågeställningarna som presenterades i avsnitt 1 är följande:

- Vilka antaganden om indataparametrar förekommer vanligen i riskutredningar?
- Hur kan man kvantitativt bedöma hur stora osäkerheterna i dessa indataparametrar/antaganden är?
- Hur påverkar dessa osäkerheter riskutredningarnas resultat?
- Vilka indataparametrar har störst påverkan på resultaten?

Det observerades en stor variation i de flesta undersökta indataparametrar. För parametrar som inte anses vara platsspecifika bedöms denna variation bero på antaganden gjorda av respektive riskutredning. Exempel på parametrar som anses vara icke platsspecifika men trots detta varierar kraftigt mellan riskutredningar är följande:

- Sannolikhet för slutkonsekvens givet olycka för respektive ämnesklass
- Skadekriterier
- Källstyrka
- Spridningsvinkel

Det är således kring dessa indataparametrar det vanligen förekommer antaganden.

En indikation på osäkerheternas storlek erhålles redan då sannolikhetsfördelningen för indataparameter tillskrivits. Detta antyder hur stora osäkerheterna är baserat på hur stort det 90 % konfidensintervallet blir. Det är främst för de parametrar med stor epistemisk osäkerhet som detta intervall är av intresse. I förlängningen kommer dessa osäkerheter att ha en inverkan på resultatet i en riskutredning, vilket är det som undersöks i detta examensarbete. Ett sätt att kvantitativt bedöma osäkerheter kring en parameter är således att tillskriva en sannolikhetsfördelning till denna baserat på statistiskt underlag.

För de platsspecifika parametrarna såsom mängder som transporteras av respektive ämnesklass finns ofta information att tillgå i form av statistik från Trafikverket. För platsspecifika parametrar förmedlar sannolikhetsfördelningens intervall endast den naturliga variation som förekommer.

Den indataparameter som har störst påverkan på individrisken på samtliga undersökta avstånd är frekvens för olycka med farligt gods. Därefter hade olika indataparametrar varierande inverkan på individrisken vid olika avstånd. Samhällsrisknivån påverkas mest av indataparametrarna frekvens för olycka med farligt gods, följt av sannolikhet för pölbrand giver olycka och andel av ämnesklass 2.3.

Osäkerheterna i indataparametrarna ger upphov till variationer som uppgår till två tiopotenser för riskmåttens individ- och samhällsrisk. I praktiken kan detta innebära att olika antaganden om indataparametrar i en riskutredning ger upphov till olika slutsatser.

Som konstaterat i avsnitt 6.5 är jämförelsestudien som fungerar som underlag till detta examensarbete relativt begränsat i omfattning. Detta examensarbete hade kunnat förbättras om underlaget hade utgjorts av en mer omfattande jämförelsestudie där fler riskutredningar behandlats och kartlagts på ett mer systematiskt sätt. Rekommendationen är således att en ny jämförelsestudie genomförs där ett större antal riskutredningar kartläggs. Ett förslag på tillvägagångssätt som ligger närmre i tid är att i stället hantera osäkerheterna genom att till exempel tydligt förmedla dessa i riskutredningar. Ytterligare ett sätt att hantera osäkerheterna är att implementera liknande metodik som i detta examensarbete där indataparametrar ingår som fördelningar för att sedan även kunna presentera ett konfidensintervall vid presentation av olika riskmått. En baksida med detta tillvägagångssätt är att beslutsfattarprocessen kan hämmas. Om ett riskmått presenteras med inkluderade osäkerheter kan väntevärdet och gränserna för konfidensintervallet hamna på olika sidor av acceptanskriterierna vilket av beslutsfattaren kan tolkas som en tvetydighet i riskutredningens slutsats.

8 Referenser

- Almgren, R. (2007). *Räddningstjänst vid olycka med gaser, andra reviderade utgåvan*. Räddningsverket, NRS Tryckeri AB, Huskvarna.
- Alvarsson, O. & Jansson, J. (2016). *Jämförelsestudie av riskbedömningar avseende vägtransport av farligt gods*. Lund: Riskhantering och samhällssäkerhet.
- Alveteg, M. (2014). *Handbook, Physical properties, correlations and equations in Chemical Engineering*. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Lund University.
- Ardin, F. & Markselius, M. (2016). Utsläpp av farligt gods vid vägtransport - Utvärdering av modell för frekvensberäkning. Lund: Riskhantering och samhällssäkerhet.
- Aven, T. (2016). *On the use of conservatism in risk assessments*. Reliability Engineering & System Safety Volume 146, pp. 33-38.
- Berner, C. & Flage, R. (2016). *Strengthening quantitative risk assessments by systematic treatment of uncertain assumptions*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 151, July 2016, s. 46-59.
- Boverket. (2006). *Miljöbedömningar för planer enligt plan- och bygglagen - en vägledning*.
- Cedergren, A. & Hassel, H. (2017). *A Risk Assessment Framework for Land Use Planning*. Draft version. Kurslitteratur VRSN30 Samhällsplanering.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety). (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety). (2009). *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. New York: John Wiley & Sons.
- Christou, M., Gyenes, Z., & Struckl, M. (2011). *Risk assessment in support to land-use planning in Europe: Towards more consistent decisions?* Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 24, Issue 3, s. 219-226.
- Clark, C. E. (1962). *The PERT model for the distribution of an activity*. Operations Research 10, s. 405-406.
- Cozzani, V., Bandini, R., Basta, C., Christou, M. (2006). *Application of land-use planning criteria for the control of major accident hazards: A case-study*. Journal of Hazardous Materials. Volume 136, Issue 2, s. 170-180.
- Fischer, S., Forsén, R., Hertzberg, O., Jacobsson, A., Koch, B., Runn, R., Thaning, L., & Winter, S. (1998). *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor. Metoder*

för bedömning av risker. Andra reviderade och utökade upplagan. Umeå: Försvarets forskningsanstalt.

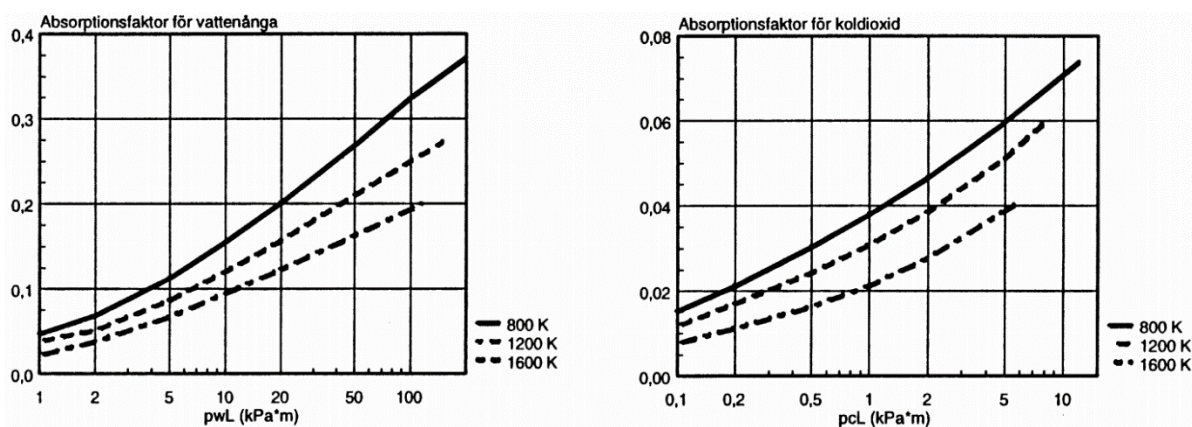
- Flage, R., Aven, T. & Berner, C. L. (2018). *A comparison between a probability bounds analysis and a subjective probability approach to express epistemic uncertainties in a risk assessment context – A simple illustrative example*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 169, pp. 1-10.
- Frank, W. & Jones, D. (2010). *Choosing Appropriate Quantitative Safety Risk Criteria: Applications from the New CCPS Guidelines*. Process Safety Progress, Volume 29, No. 4, pp. 293-298.
- Goerlandt, F., Khakzad, N., & Reniers, G. (2017). Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review. Safety Science. Volume 99, Part B, ss. 127-139.
- Golenko-Ginzburg, D. (1988). *On the Distribution of Activity Time in PERT*. The Journal of the Operational Research Society, Vol. 39, No. 8, s. 767-771
- Gooijer, L., Cornil, N. & Lenoble, C. L. (2012). *An international comparison of four quantitative risk assessment approaches - A benchmark study based on a fictitious LPG plant*. Process Safety and Environmental Protection. Volume 90, Issue 2, s. 101-107
- Kaplan, S. & Garrick, B. J. (1981). *On the quantitative definition of risk*. Risk Analysis, Vol. 1, No. 1, s. 11-27
- Kaplan, S., Haines, Y.Y. & Garrick, B.J. (2001). *Fitting Hierarchical Holographic Modeling into the Theory of Scenario Structuring and a Resulting Refinement of the Quantitative Definition of Risk*. Risk Analysis, Vol. 21, No. 5.
- Khorsandi, J. & Aven, T. (2017). *Incorporating assumption deviation risk in quantitative risk assessments: A semi-quantitative approach*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 163, s. 22-32
- Labovský, J., Jelemenský, L. (2013). *CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments*. Chemical Papers. Volume 67, Issue 12, pp. 1495-1503.
- Länsstyrelsen i Skåne län. (2007). *Riktlinjer för riskhänsyn i samhällsplaneringen - bebyggelseplanering intill väg och järnväg med transport av farligt gods*.
- Länsstyrelserna i Skåne, Stockholms och Västra Götalands län. (2006). *Riskhantering i detaljplaneprocessen*. Länsstyrelserna i Skåne, Stockholms och Västra Götalands län. s. 3
- Länsstyrelsen Stockholm. (2016). *Riktlinjer för planläggning intill vägar och järnvägar där det transporteras farligt gods*.

- MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap). (2015). *Samhällsplanering och riskhantering i anslutning till storskalig kemikaliehantering*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. s. 37
- MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap). (2017). *Transport av farligt gods. Väg och järnväg 2017/2018*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. s. 10, 26
- MSB RIB. (2018-09-29). Informationsdatabas av MSB. Information erhållen 2018-09-29. <https://rib.msb.se/>.
- Palisade Corporation. (2016). *@RISK User's Guide. Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel*. Ithaca, New York: Palisade Corporation.
- 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. Volume 22, ss. 769-777.
- Pasman, H., Rogers & W., Mannan, M. S. (2017). *Risk assessment: What is it worth? Shall we just do away with it, or can it do a better job?* Safety Science. Volume 99, Part B, ss. 140-155
- Paté-Cornell, M. E. (1996). *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*. Reliability Engineering and System Safety. 54, pp. 95-111.
- Rausand, M. (2013). *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Räddningsverket (1997). *Värdering av risk*. Karlstad: Statens Räddningsverk.
- Räddningsverket (2003). *Handbok för riskanalys*. Karlstad: Statens Räddningsverk.
- Saltelli, A. (2002). *Sensitivity analysis for importance assessment*. Risk Analysis. Volume 22, No. 3. p. 579.
- SFS 1998:808. (1998). *Miljöbalk (1998:808)*. Miljö- och energidepartementet.
- SFS 2006:263. (2006). *Lag (2006:263) om transport av farligt gods*. Justitiedepartementet.
- SFS 2010:900. (2010). *Plan- och bygglag (2010:900)*. Näringsdepartementet.
- SKL (Sveriges Kommuner och Landsting). (2012). *Transporter av farligt gods. Handbok för kommunernas planering*. Stockholm: Sveriges Kommuner och Landsting. ss. 46-47.
- SMHI. (2018-05-21). *Svenska lufttrycksrekord*. Erhållen 2018-05-21. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/svenska-lufttrycksrekord-1.5096>

- Swedish Standards Institute. (2009). *Svensk Standard SS-ISO 31000:2009, Riskhantering - Principer och riktlinjer*. Stockholm: Swedish standards institute.
- Thomasson, M. (2017). *Riskreducerande åtgärder - effektutvärdering med tillämpning på transport av farligt gods*. Lund: Riskhantering och samhällssäkerhet.
- Torretta, V., Rada, E. C., Schiavon, M., Viotti, P. (2017). *Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: A review*. Safety Science. Volume 92, ss. 1–9
- Tugnoli, A., Gyenes, Z., Van Wijk, L., Christou, M., Spadoni, G. & Cozzani, V. (2013). *Reference criteria for the identification of accident scenarios in the framework of land use planning*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 26. pp. 614-627.
- Trafikverket. (2015) *Vägars och gators utformning – Begrepp och grundvärden*. Borlänge: Trafikverket. s. 38.
- Vose, D. (2008). *Risk analysis: A quantitative guide (3rd ed.)*. Chichester: Wiley.
- VTI (Väg- och transportforskningsinstitutet). (1994). *VTI RAPPORT 387:1. Riskanalysmetod för transporter av farligt gods på väg och järnväg – Projektsammanfattning*. Linköping: Väg- och transportforskningsinstitutet. ss. 15-17.
- WSP Brand & Risk. (2011). *Detaljerad riskbedömning avseende farligt gods på Drottningholmvägen i höjd med Tranebergsvägen*. Stockholm: WSP Brand & Risk.
- Öberg, T. (2009). *Miljöriskanalys*. Upplaga 1. Lund: Studentlitteratur.

Bilaga A Beräkningar av konsekvensavstånd

I Figur 29 nedan redovisas en grafisk översikt över absorptionsfaktorer för vattenånga och koldioxid som funktion av partialtryck, avstånd/strålväg och flamtemperatur.



Figur 29. Samband mellan absorptionsfaktorer för vattenånga och koldioxid (α_w respektive α_c), partialtryck (p_w respektive p_c), strålväg (L) och flamtemperatur (Fischer et al., 1998: 325).

Värden för p_cL och p_wL erhålls genom att multiplicera partialtryck för vattenånga respektive koldioxid med avståndet/strålvägen mellan ytan A_1 till ytan A_2 . Partialtrycket för koldioxid (p_c) är alltid 30 Pa medan partialtrycket för vattenånga (p_w) är beroende av den relativa fuktighet och temperatur som råder. Fischer et al. (1998) beskriver i en tabell hur trycket av mättad vattenånga varierar med temperatur. Denna information redovisas i Tabell 35 nedan.

Tabell 35. Variation av vattenångas tryck vid olika temperaturer. Värden i tabellen gäller för mättad vattenånga (tabell från Fischer et al., 1998: 324).

Temperatur (°C)	Ångtryck (Pa)
-20	100
-10	260
0	610
10	1 230
20	2 340

Därutöver behövs flamtemperatur T för att kunna ta reda på absorptionskoefficienterna från Figur 29 ovan. Flamtemperaturen kan fås ut genom en omskrivning av Stefan Boltzmanns lag om svartkroppsstrålning (Fischer et al., 1998: 315). Denna omskrivning illustreras i Ekvation 25 nedan.

$$P_s = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\sigma \cdot P_s} \quad \text{Ekvation 25}$$

σ	Stefan Boltzmanns konstant = $5,76 \cdot 10^{-8}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
P_s	Strålning från en svart kropp	$[W \cdot m^{-2}]$
T	Temperatur (flamtemperatur)	$[K]$

För att sambandet i Ekvation 25 ovan skall gälla antas att källan är en idealt svart kropp.

Med utgångspunkt i Tabell 35 och Ekvation 25 kan nu absorptionsfaktorerna för vattenånga och koldioxid nu utläsas från Figur 29 ovan.

A.1 Värmestrålning

Värmestrålning beräknas med hjälp av Ekvation 26 nedan.

$$P_{12} = P_1 \cdot \tau_a \cdot F_{12} \quad \text{Ekvation 26}$$

P_{12}	Infallande strålning från ytan A_1 till ytan A_2	[W m ⁻²]
P_1	Strålningen från ytan A_1	[W m ⁻²]
τ_a	Transmissionsförmågan	[-]
F_{12}	Vinkelkoefficienten för A_1 mot A_2	[kg s ⁻¹]

$$P = \frac{0,35 \cdot b' \cdot h_c}{1 + 4h_f/d_f} \quad \text{Ekvation 27}$$

P	Strålning	[W m ⁻²]
b'	Förbränningshastighet per ytenhet vid pölbrand	[kg m ⁻² s ⁻¹]
h_c	Energivärde	[J kg ⁻¹]
h_f	Flamhöjd (pölbrand)	[m]
d_f	Flamdiameter (pölbrand) (=1)	[m]

Anledningen till att förbränningshastighet, flamhöjd och flamdiameter för pölbrand används är för att vid beräkning av värmestrålning från jetflamma är det kutym att fördubbla värdet av värmestrålningen för en icke sotande pölbrand (Fischer et al., 1998: 321). Detsamma gäller vid beräkning av värmestrålning från BLEVE. Hur beräkning av flamhöjd för pölbrand genomförs går att utläsa i Ekvation 17 i avsnitt 5.2.3.1 nedan.

För att beräkna transmissionsförmågan används Ekvation 28 nedan.

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad \text{Ekvation 28}$$

α_c	Absorptionsfaktor (koldioxid)	[-]
α_w	Absorptionsfaktor (vattenånga)	[-]

För att erhålla absorptionsfaktorerna för koldioxid och vattenånga för att kunna finna en lösning på Ekvation 28 ovan kan olika diagram i Fischer et al. (1998: 325). Dessa diagram och beräkningsgång för att kunna utläsa data ur dessa återfinns i Bilaga A.

Till sist fordras vinkelkoefficienten för A_1 mot A_2 . Denna koefficient beräknas med hjälp av Ekvation 29 nedan.

$$F_{12} = (r_v/x)^2 \cos \theta \quad \text{Ekvation 29}$$

r_v	Eldklotets radie	[m]
x	Avstånd mellan objekt och eldklotets centrum	
θ	Vinkel mellan normal till objektets yta och linje mellan objektet och strålkällans centrum	[°]

A.2 Gasspridning

I denna bilaga redovisas tillvägagångssätt för att beräkna konsekvensavstånd för de slutkonsekvenser som resulterar i gasspridning. De slutkonsekvenser som avses är giftigt gasmoln till följd av utsläpp av ämnesklasserna 2.3 och 3 (se avsnitt 5.2.2.1 och 5.2.3.4).

A.2.1 Modell för passiv spridning från kontinuerligt utsläpp

Enligt sedvana observeras endast koncentrationen vid marken ($z = 0$) och i plymens mitt ($y = 0$) (Fischer et al., 1998). Detta innebär att uttrycket i Ekvation 13 ovan kan förkortas. I Alvarsson & Jansson (2016) framgår det inte heller tillräcklig information om vilken punkt koncentrationsberäkningar görs för med avseende på vindriktningens vinkelräta eller vertikala utspridning. Således måste en förkortad variant av uttrycket användas eftersom väsentlig information saknas för att kunna nyttja Ekvation 13 ovan. Det förkortade uttrycket presenteras i Ekvation 30 nedan.

$$\chi(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot U} \cdot e^{-\frac{H_{eff}^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \quad \text{Ekvation 30}$$

I Alvarsson & Jansson (2016) framgår heller inte i tillräckligt hög utsträckning vilka siffror respektive riskutredning ansatt för utsläppskällans höjd över marken (H_{eff}). Då värdet för värdet för utsläppskällans höjd över marken är okänt ansätts detta värde till 0 (Fischer, et al., 1998: 210). På grund av detta kan Ekvation 30 ovan förkortas i ytterligare ett steg. Det förkortade uttrycket illustreras i Ekvation 31 nedan.

$$\chi(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot U} \quad \text{Ekvation 31}$$

För att bestämma standardavvikelserna/dispersionskoefficienterna σ_y och σ_z rekommenderar Fischer et al. (1998) att Ekvation 32 och Ekvation 33 nedan.

$$\sigma_y = \frac{a_y(x + x_{y0})}{(1 + b_y(x + x_{y0}))^{1/2}} K_{rp} \cdot K_{yt} \quad \text{Ekvation 32}$$

$$\sigma_z = \frac{a_z(x + x_{z0})}{(1 + b_z(x + x_{z0}))^{y_z}} K_{rp} \quad \text{Ekvation 33}$$

K_{rp} ansätts till 1 då det är bebyggt område som undersöks. Även K_{yt} ansätts till 1 då det är relevant att undersöka den högsta koncentrationen i plymen (Thomasson, 2017: 77). I Ekvation 34 nedan illustreras hur x_{y0} beräknas.

$$x_{y0} = \frac{\left(\frac{\sigma_{y0}}{K_{rp} \cdot K_{yt}}\right)^2 b_y + \frac{\sigma_{y0}}{K_{rp} \cdot K_{yt}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{y0}}{K_{rp} \cdot K_{yt}}\right)^2 b_y^2 + 4a_y^2}}{2a_y^2} \quad \text{Ekvation 34}$$

Detta uttryck förändras inte beroende på stabilitetsklass. För x_{z0} finns emellertid olika uttryck beroende på vilken stabilitetsklass som råder (Fischer et al., 1998). För stabilitetsklass B beräknas x_{z0} enligt Ekvation 35 nedan.

$$x_{z0} = \frac{\left(\frac{\sigma_{z0}}{K_{rp}}\right)^2 b_z + \frac{\sigma_{z0}}{K_{rp}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{z0}}{K_{rp}}\right)^2 b_z^2 + 4a_z^2}}{2a_z^2} \quad \text{Ekvation 35}$$

För stabilitetsklass D beräknas x_{z0} i stället enligt Ekvation 36 nedan.

$$x_{z0} = \frac{\sqrt{\frac{4 \frac{\sigma_{z0}}{K_{rp}} (\sqrt{2} - 1) b_z}{a_z} - 1}}{2(\sqrt{2} - 1) b_z} \quad \text{Ekvation 36}$$

σ_{y0}, σ_{z0} Initiala dimensionsmått i atmosfärspridningsmodell [m]
(standardavvikelse vid avstånd $x=0$)

I Tabell 36 nedan presenteras stabilitetsberoende parametrar som gäller för bebyggt område, vilket gäller för de utredningar som Alvarsson & Jansson (2016) behandlat.

Tabell 36. Stabilitetsberoende parametrar för bebyggt område (Fischer et al., 1998).

Stabilitet	a_y	b_y	γ_y	a_z	b_z	γ_z
A	0,32	0,0004	0,5	0,24	0,001	-0,5
B	0,32	0,0004	0,5	0,24	0,001	-0,5
C	0,22	0,0004	0,5	0,20	0	0
D	0,16	0,0004	0,5	0,14	0,0003	0,5
E	0,11	0,0004	0,5	0,08	0,0015	0,5
F	0,11	0,0004	0,5	0,08	0,0015	0,5

För att beräkna de initiala dimensionsmåten i atmosfärspridningsmodellen kan de "Default"-värden som föreslås i Fischer et al. (1998) användas. Detta beräknas enligt Ekvation 37 nedan.

$$\sigma_{y0} = \sigma_{z0} = 0,6 \sqrt{\frac{Q}{\rho_a U} \frac{m_g + m_a}{m_g}} \quad \text{Ekvation 37}$$

m_a	Molmassa för luft (28,85)	[kg kmol ⁻¹]
m_g	Molmassa för utsläppt substans	[kg kmol ⁻¹]
U	Advektionshastighet av plym	[m s ⁻¹]

A.2.2 Modell för tunggasspridning från kontinuerligt utsläpp

Det andra representativa ämnet som angavs i jämförelsestudien för denna ämnesklass var svaveldioxid. Denna gas är tyngre än luft och modellen i Fischer et al. (1998) som används för spridning av tunggas anges i Ekvation 15 nedan.

$$\chi_m(x) = \chi(x, 0, 0) = \frac{85Q \cdot K_r^{-1} \cdot K_s}{\left(x + \sqrt{85\pi \cdot K_r^{-1} \cdot K_s \cdot \sigma_{z0} \cdot \sigma_{y0}}\right)^2 \cdot U} \quad \text{Ekvation 15}$$

χ_m	Högsta koncentration i centrum av plym i marknivå	[kg m ⁻³]
K_r	Korrektionsfaktor för skrovlighet av underlag vid tunggasspridning	[-]
K_s	Korrektionsfaktor för atmosfärens stabilitet vid tunggasspridning	[-]
σ_{y0}, σ_{z0}	Initiala dimensionsmått i atmosfärspridningsmodell (standardavvikelse vid avstånd x=0)	[m]

Tunggaseffekterna blir emellertid försumbara då tillväxten av gasmolnets plym kan likställas med värden som gäller för passiv spridning. För att avgöra när tunggasmodellen är giltig används avståndsvillkoret i nedan.

$$x \leq \frac{0,0037L_b}{(\sigma'_{yp})^3} - \frac{\sigma_{y0}^{3/2}}{0,35L_b^{1/2}} = x_{MAX} \quad \text{Ekvation 16}$$

L_b	Längdskala för tunggasutsläpp	[m]
σ'_{yp}	Tillväxthastighet av passiv plym med avstånd x, $d\sigma_y/dx$	[m m ⁻¹]

A.2.3 Koncentrationsmått

För att beräkna olika koncentrationsmått har de samband som presenteras i Fischer et al. (1998: 239-241) använts. Ett förtydligande av tillvägagångssätt görs i denna bilaga.

Då masskoncentrationen, χ , beräknas erhålls koncentrationen i enheten kilogram per kubikmeter. Enligt sedvänja anges gränsvärden för risk för dödsfall i enheten *parts per million* (ppm). Denna enhet kan anges både i massandel, *ppm(m)*, eller volymandel, *ppm(V)*.

I detta examensarbete behandlas denna enhet i kontexten gasspridning varför volymandel är av relevans. För att erhålla detta koncentrationsmått från utdata i den modell som använts behöver därför Ekvation 38 nedan användas.

$$C_g = \frac{Y_g \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)}{1 + Y_g \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} - 1 \right)} \quad \text{Ekvation 38}$$

C_g	Volymandel	$[\text{m}^3 \text{ m}^{-3}, \text{ppm}]$
Y_g	Massandel	$[\text{kg}^{-1} \text{ kg}^{-1}, \text{ppm}]$
ρ_a	Densitet oblandad luft = 1,28	$[\text{kg m}^{-3}]$
ρ_g	Densitet av utsläppt gas utan inblandning av luft	$[\text{kg m}^{-3}]$

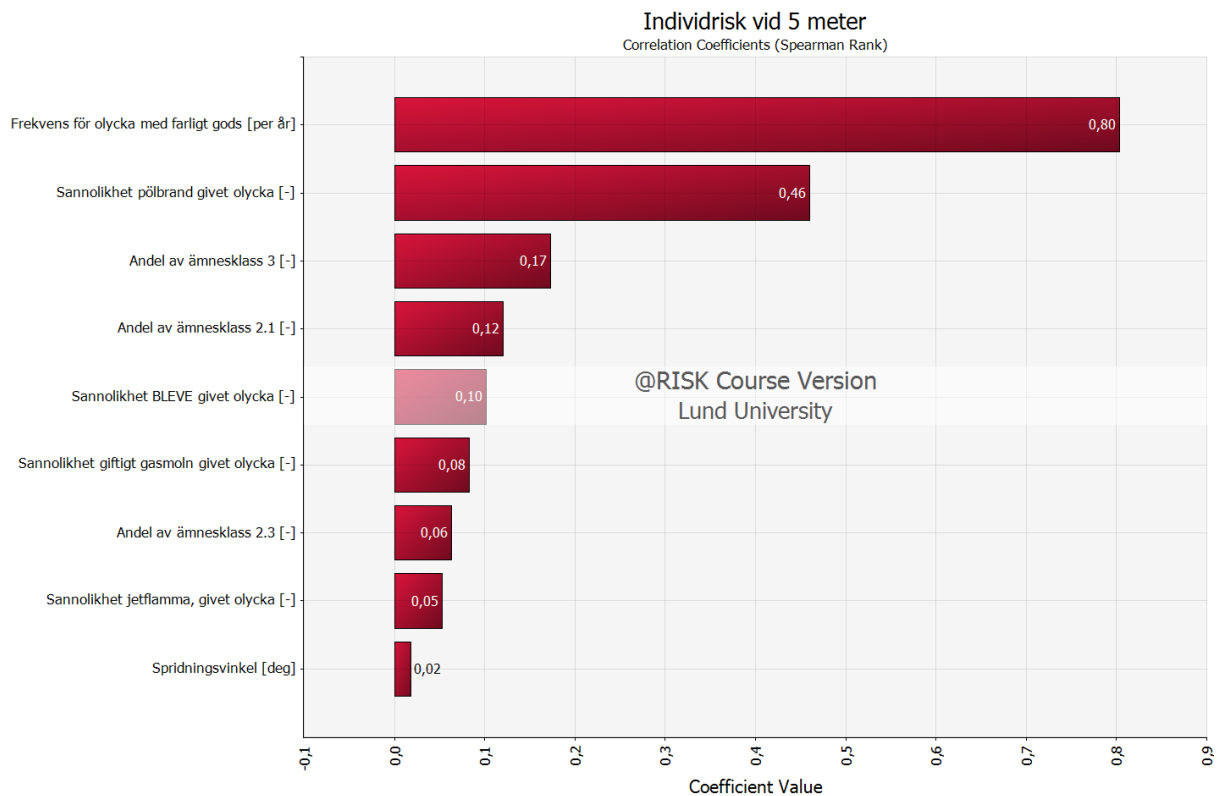
För att beräkna volymandelen, C_g , behöver först massandelen, Y_g , beräknas. Detta görs enligt Ekvation 39 nedan.

$$Y_g = \frac{\chi}{\rho_a + \chi \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)} \quad \text{Ekvation 39}$$

Genom att använda ovanstående samband går det att utröna vilka koncentrationer i *parts per million* (volymandel) som motsvarar de masskoncentrationer som beräknats för exempelvis giftigt gasmoln.

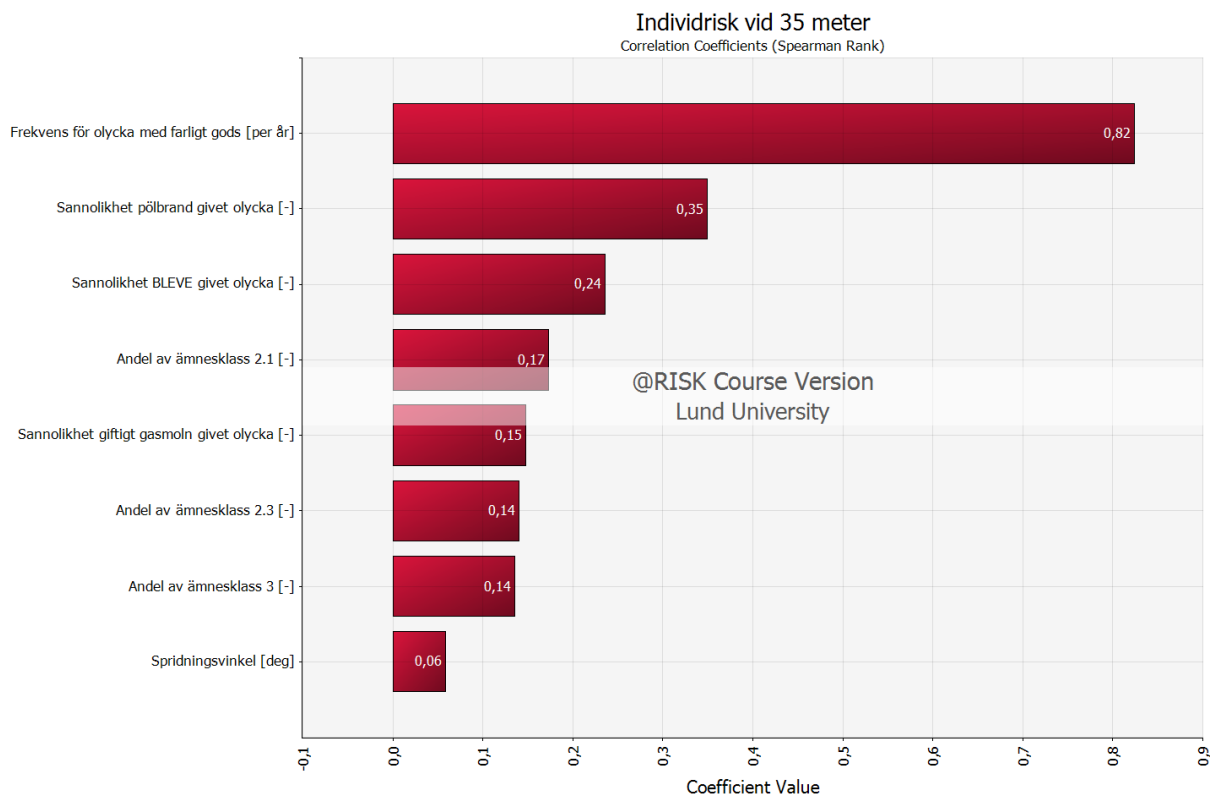
Bilaga B Känslighetsanalyser

För att undersöka vilka indataparametrar som påverkade individrisken mest genomfördes en känslighetsanalys vid de olika avstånd som valts ut. En känslighetsanalys för individrisk vid 5 meter presenteras i Figur 30 nedan.



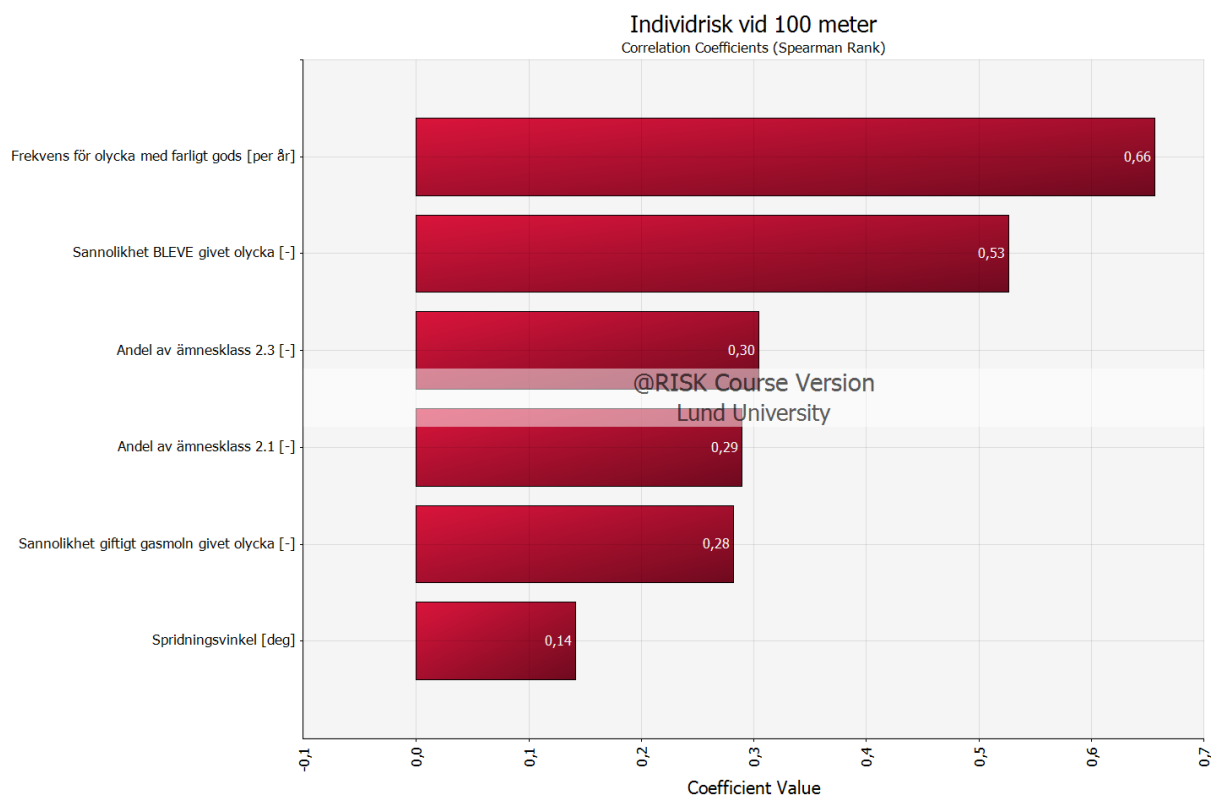
Figur 30. Känslighetsanalys för individrisk vid avståndet 5 meter från väg.

En känslighetsanalys för individrisk vid 35 meter presenteras i Figur 31 nedan.



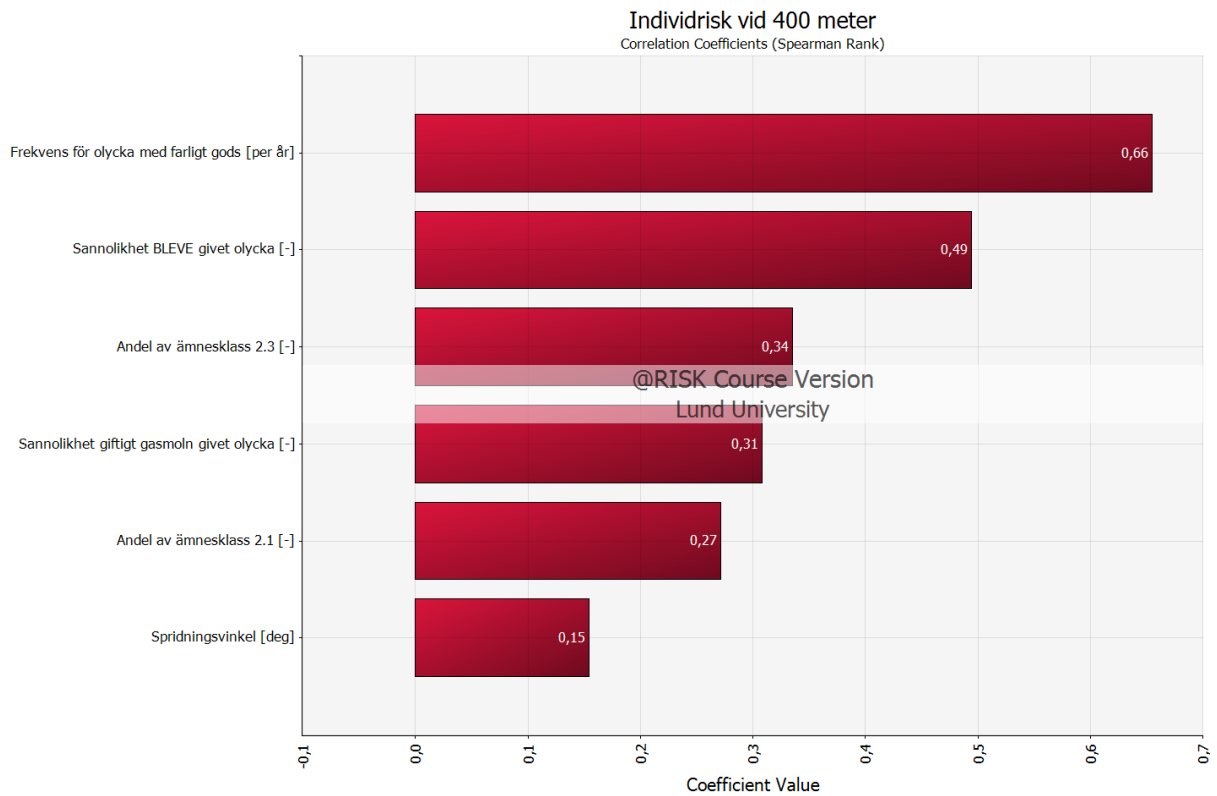
Figur 31. Känslighetsanalys för individrisk vid avståndet 35 meter från väg.

En känslighetsanalys för individrisk vid 100 meter presenteras i Figur 32 nedan.



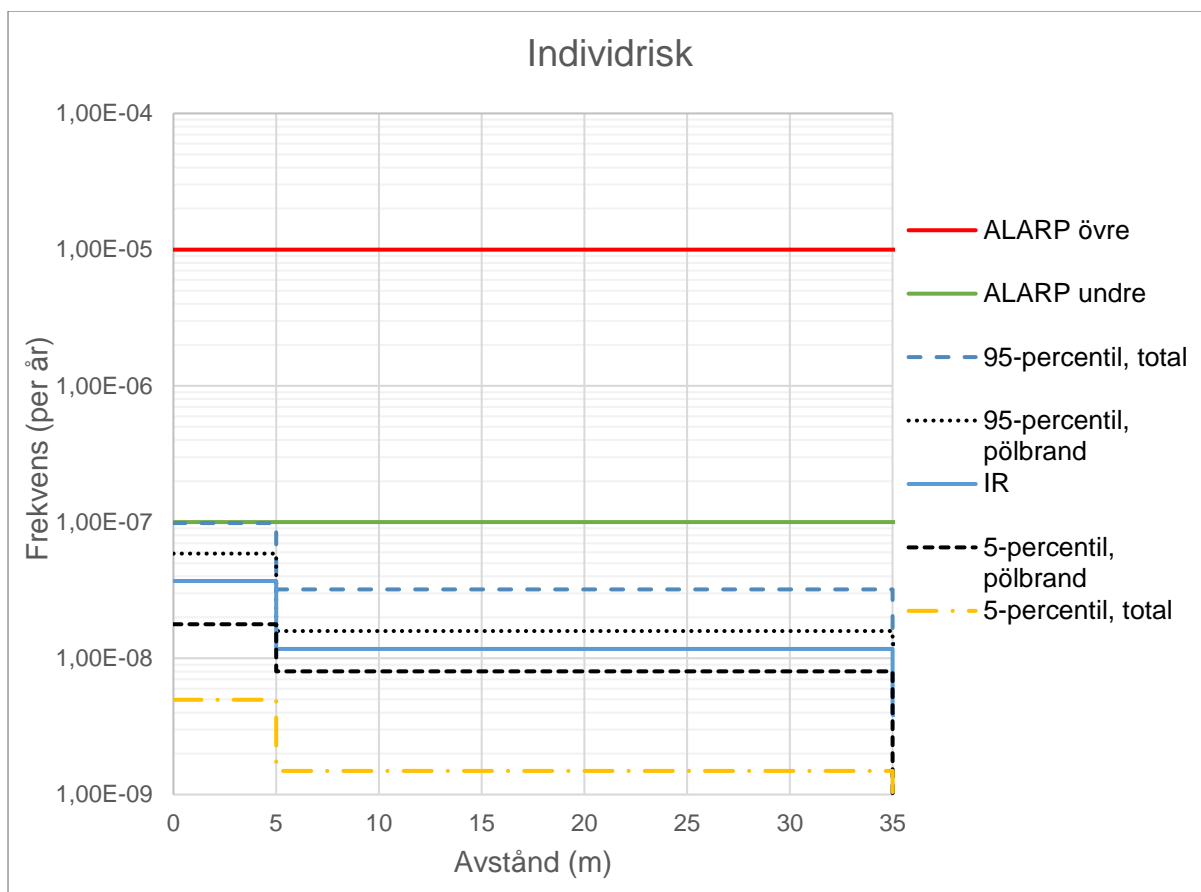
Figur 32. Känslighetsanalys för individrisk vid avståndet 100 meter från väg.

En känslighetsanalys för individrisk vid 400 meter presenteras i Figur 33 nedan.



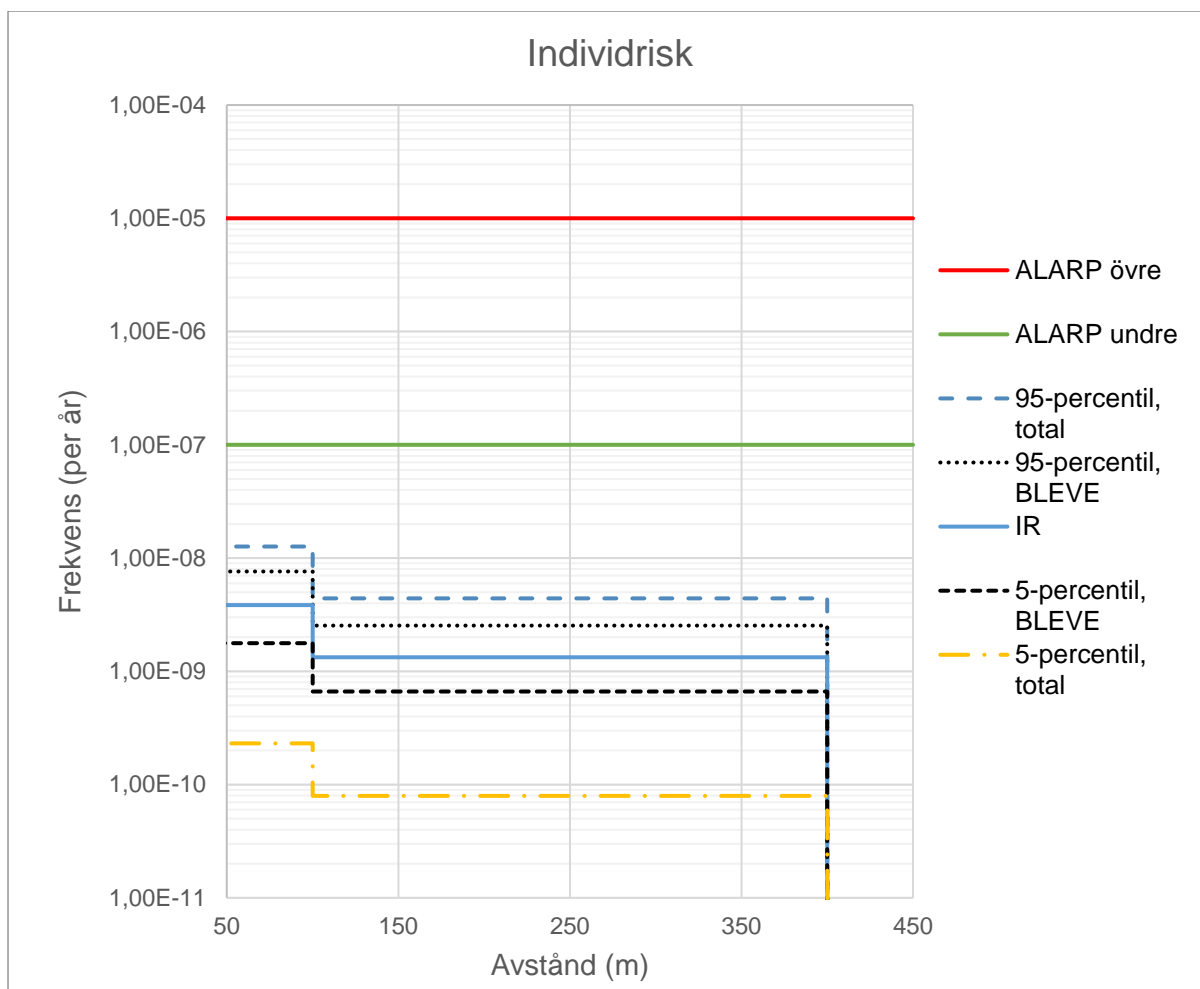
Figur 33. Känslighetsanalys för individrisk vid avståndet 400 meter från väg.

För att undersöka hur osäkerheten i indataparametern sannolikhet för pölbrand givet olycka påverkar risknivån beräknades individrisken med denna indataparameter ingående som PERT-fördelning medan övriga indataparametrar ingår som konstanter med sina väntevärden. Därefter undersöktes konfidensintervallet (90 %) och ritades upp som en individriskprofil. Resultatet av dessa beräkningar presenteras i Figur 34 nedan.



Figur 34. Effekten som indataparametern sannolikhet för pölbrand givet olycka har på risknivån åskådliggjort i en individriskkurva vid relevanta avstånd.

På samma sätt beräknades osäkerheten för indataparametern sannolikhet för BLEVE givet olycka. Resultatet presenteras i Figur 35 nedan.



Figur 35. Effekten som indataparametern sannolikhet för BLEVE givet olycka har på risknivån åskådliggjort i en individriskkurva vid relevanta avstånd.

Bilaga C Övriga data och samband

I Ekvation 40 nedan illustreras tillvägagångssättet för att omvandla volymprocent ($V \%$) till massprocent ($M \%$).

$$M \% = \frac{V \% \cdot M_w}{V \% \cdot M_w + (100 - V \%) \cdot M_{w,luft}} \quad \text{Ekvation 40}$$

Om massprocent sedan skall omvandlas till parts per million (ppm) nyttjas sambandet att 1 massprocent motsvarar 10 000 ppm.

Tabell 37. Pasquills stabilitetsklasser.

Vindhastighet (m/s)	Dagtid, starkt solsken	Dagtid, lätt molnighet	Dagtid, molnigt	Natt, klart väder	Natt, molnigt
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D