

Beräkningsbilaga

Cathrine Klingspor

Telefon

010-505 76 41

Mobil

072-221 04 48

E-post

cathrine.klingspor@afry.com

Datum

06/07/2022

Projekt ID

216565

Kund

Stadsbyggnadskontoret, Göteborgs stad

Beräkningsbilaga till Riskutredning för detaljplan för Blandad stadsbebyggelse vid Frölunda Torg

Uppdragsledare: Cathrine Klingspor

Handläggare: Gustaf Zetterberg & Mario Rubil

Intern kvalitetsgranskning: Maria Svärd

Beräkningsbilaga

Innehållsförteckning

1	Bilaga A – Frekvensberäkning.....	4
1.1	Väderdata.....	4
1.1.1	Vindhastighet	5
1.1.2	Stabilitetsklass.....	5
1.1.3	Vindriktning.....	7
1.2	Trafikolycka väg	7
1.3	Olycka explosiva ämnen.....	9
1.4	Olycka brandfarlig gas	10
1.4.1	Jetbrand	10
1.4.2	Gasmolnsbrand/explosion.....	10
1.4.3	BLEVE	11
1.5	Olycka giftig gas	12
1.6	Olycka brandfarlig vätska	13
1.7	Olycka med oxiderande ämnen och organiska peroxider	16
1.8	Summering frekvensberäkningar.....	18
2	Bilaga B – Konsekvensberäkning.....	19
2.1	Generella skadekriterier	19
2.2	Olycka med explosiva ämnen.....	20
2.3	Olycka brandfarlig gas	23
2.4	Olycka giftig gas	24
2.5	Olycka brandfarlig vätska	26
2.6	Olycka med oxiderande ämne	27
	Referenser	28

Beräkningsbilaga

Dokumenthistorik

Ver.	Status	Datum
A	Rapportutkast	2022-06-23
B	Granskad av kund	2022-07-06

Beräkningsbilaga

1 Bilaga A – Frekvensberäkning

Denna bilaga innehåller frekvensberäkningar för farligt gods-olycka för de händelser som tidigare identifierats längs aktuell sträcka och som kan leda till utsläpp av farligt gods som påverkar studerade skyddsvärda objekt.

I denna riskutredning har konsekvens- och frekvensberäkningar gjorts med programvaran Riskcurves [1]. Programmet har tagits fram av The Netherlands Organisation for applied scientific research (TNO) som är ett oberoende forskningsinstitut. Frekvensberäkningar i föreliggande studie baseras till stor del på de källor som används i Riskcurves [2]. Där dessa frångås nämns detta uttryckligen. Beräkningarnas konsekvensmodelleringar är förankrade i empiri och forskningsdata med en gedigen referenslista. Verktøjets fördelar är att olika modeller kan byggas upp och beräknas relativt snabbt. Det är också enkelt att plocka ut relevanta och tydliga resultat i tabeller, grafer och kartbilder.

1.1 Väderdata

Närmsta väderstation i förhållande till studerade bebyggelse är "Göteborg A", se Figur 1-1. Data för vind och temperatur har tagits från mätstationen under åren 2012-2022 (t.o.m. majmånad).

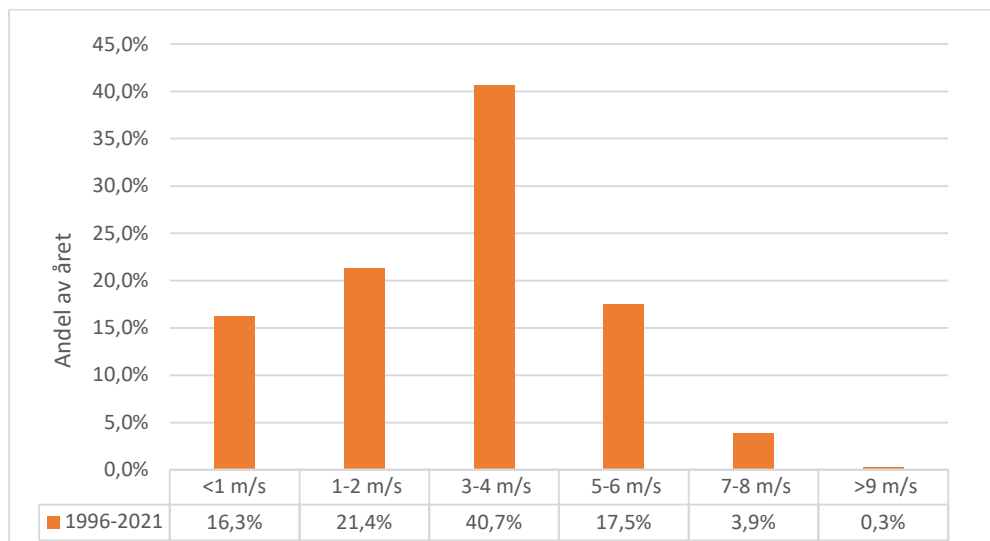


Figur 1-1. Placering av mätstation "Göteborg A" i förhållande till utredningsområdet. [3]

Beräkningsbilaga

1.1.1 Vindhastighet

Vindens hastighet påverkar till stor del resultatet av spridningsberäkningen. Spridningen från en olycka blir värre i olyckans närhet om ett lägre värde på vindhastighet används. I Figur 1-2 visas fördelningen av vindstyrka mellan 2012-2022 (t.o.m. majmånad). Medelvärde under denna period var 2,79 m/s. Vindstilla förhållanden råder under ca 16,3 % av året, se Figur 1-2. I analysen har 2,0 m/s använts för svag vind och 5,0 m/s för normal och stark vind.



Figur 1-2. Vindhastighet under 2012-2022 (t.o.m. majmånad) redovisad som andel av tid uppmätt på SMHI:s väderstation "Göteborg A".

1.1.2 Stabilitetsklass

I beräkningsmodellen kommer Pasquills stabilitetsklasser att användas. Pasquills stabilitetsklasser beskriver hur instabil eller stabil luftmassan närmast jordens yta är, dvs. turbulensen. Turbulensen i sin tur har stor påverkan för hur ett utsläpp till luft sprids, framförallt i betydelsen av hur koncentrationen beror av avståndet från utsläppskällan. Ju mer turbulens/ju mer stabil luftmassa, desto mindre omblandning och utspädning av utsläppet vilket innebär längre konsvensavstånd. Detta beror främst på mängden solinstrålning, dvs. att ju mer solinstrålning desto mer värms luften närmast marken upp och rör sig uppåt och ökar turbulensgraden i luftskiktet. Således är det främst under natten som luften är stabil, dvs. när det inte finns någon solinstrålning. I Tabell 1-1 görs en beskrivning av Pasquills stabilitetsklasser.

Beräkningsbilaga

Tabell 1-1. Beskrivning av Pasquills stabilitetsklasser [2] & [4].

Turbulens	Beskrivning, väderförhållande	Pasquills stabilitetsklass	Ungefärliga vindhastigheter [m/s]
Instabil	Måttligt till mycket solinstrålning (soligt molnfritt väder, där solen står högt på himlen (större än 60 grader)) och måttliga till svaga vindar gör att atmosfären blir instabil.	A: Extremt instabilt B: Måttligt instabilt C: Svagt instabilt	<2,5 2,5-4 4<
Neutral	Relativt starka vindar och måttlig solinstrålning (molnig väderlek och/eller klar väderlek där solen står lågt på himlen (mellan 15 -35 grader)) är associerade med neutral/måttlig turbulens	D: Neutral	0-15
Stabil	Låg/ingen solinstrålning och svaga vindar. Sker främst under natten.	E: Svagt stabilt	2,5<
		F: Måttligt – extremt stabilt	<2,5

För att ta höjd för olika förhållanden av vindstyrka och stabilitetsklasser används tre olika kombinationer:

- 2F: Stabilitetsklass F, vindhastighet 2 m/s
- 2D: Stabilitetsklass D, vindhastighet 2 m/s
- 5D: Stabilitetsklass D, vindhastighet 5 m/s

De valda vädersscenarierna bedöms som representativa och rimligt konservativa.

Det görs även skillnad på väderfördelningen mellan dag och natt, där det under natten är mer vanligt med låga vindhastigheter och stabila väderförhållanden. Baserat på ovan data har följande fördelning av väderkombinationer valts:

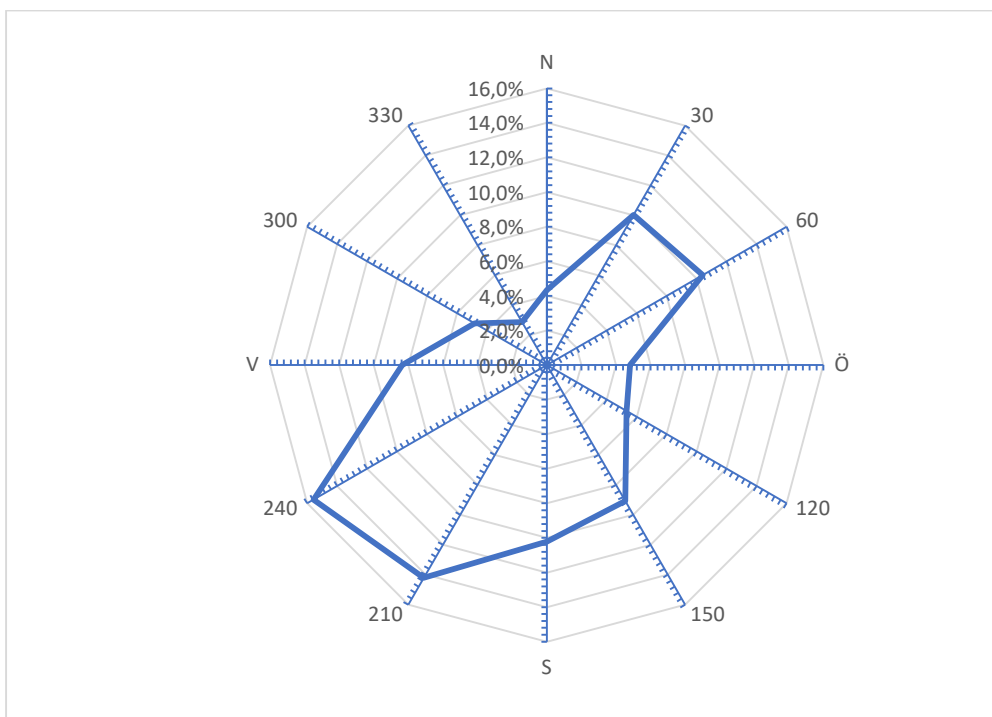
Tabell 1-2. Fördelning av väderförhållanden.

Väderförhållande	Dag	Natt
2F	5 %	20 %
2D	40 %	50 %
5D	55 %	30 %
Summa	100 %	100 %

Beräkningsbilaga

1.1.3 Vindriktning

Vindriktningen inverkar vid spridning av giftig och brandfarlig gas. Förhärskande vindriktningar är sydväst till sydsydväst vilket sker ca 30 % av tiden det blåser > 1 m/s, se Figur 1-3. Vindriktningen anges alltid i det väderstreck som det blåser från.



Figur 1-3. Vindfördelning för mätstation "Göteborg A", 2012-2022 (t.o.m. majmånad) [3]

1.2 Trafikolycka väg

I detta avsnitt redovisas frekvensberäkning för vägsträckan förbi planområdet.

I Räddningsverkets "*Färligt gods - riskbedömning vid transport*" [5] ges metoder för beräkning av frekvens för trafikolycka med transport av farligt gods. Denna riskanalysmetod (VTI-metoden) analyserar och kvantifierar riskerna med transport av farligt gods mot bakgrund av svenska förhållanden. Vid uppskattning av frekvensen för olycka med farlig gods på en specifik vägsträcka finns det två alternativ, dels att använda olycksstatistik för sträckan, dels att skatta antalet olyckor med hjälp av den så kallade olyckskvoten för vägavsnittet. I denna riskanalys används det senare av dessa alternativ.

Olyckskvotens storlek samvarierar med ett antal faktorer såsom vägtyp, hastighetsgräns, siktförhållanden samt vägens utformning och sträckning. Med hjälp av beräkningsmatris för farligt godsolyckor efter bebyggelse, hastighetsgräns och vägtyp kan följande parametrar bestämmas: olyckskvoten, andel singelolyckor och index för farligt godsolyckor (se nedan).

Enligt uppskattningar av Trafikverkets data på NVDB [6] är den totala trafikmängden per årsmedeldygn (ÅDT) längs aktuell sträcka sammanlagt 60 183 fordon men räknas upp till

Beräkningsbilaga

77 025 fordon år 2040 enligt Trafikverkets uppräkningsstal [7]. Vägsträckan som kan påverka planområdet är cirka 550 meter. År 2040 har valts som prognosår i samråd med räddningstjänsten. Beräkning av frekvens görs dock för en 1 km lång sträcka, detta anpassas sedan i beräkningsprogrammet.

Totalt trafikarbete på den studerade vägsträckan beräknas som:

$$\text{Totalt trafikarbete} = 77\,025 \text{ (fordon/dygn)} \times 365 \text{ (dygn)} \times 1 \text{ (km)} = 28,1 \text{ miljoner fordonskilometer per år}$$

Vid bedömning av antal förväntade fordonsolyckor används följande ekvation:

$$\text{Antal förväntade fordonsolyckor} = O = \text{Olyckskvot} \times \text{Totalt trafikarbete} \times 10^{-6}$$

Olyckskvoten kommer från beräkningsmatris för farligt godsolyckor för aktuell hastighetsgräns och vägtyp. Olyckskvoten uttrycks i enheten olyckor/miljon fordonskilometer. Vägsträckan utgörs på platsen av ringled i tätort med hastighetsgräns 70 km/h. Olyckskvoten för dessa förhållanden är 0,25 olyckor per miljon fordonskilometer per år.

Nedan beräknas det förväntade antalet fordonsolyckor med avseende på ovanstående trafikarbete.

$$\text{Förväntade fordonsolyckor (O)} = \text{Olyckskvot} \times \text{trafikarbete} = 0,25 \times 28,1 = 7,0 \text{ olyckor/år}$$

Antal fordon skyltade med farligt gods i trafikolyckor =

$$O \cdot ((X \cdot Y) + (1 - Y) \cdot (2X - X^2))$$

där X = Andelen transporter skyltade med farligt gods

Y = Andelen singelolyckor på vägavsnittet

O = Antal förväntade fordonsolyckor

Andelen farligt gods på vägen beräknas som:

$$\text{Andelen farligt gods} = \text{ÅDT farligt gods} / \text{ÅDT total}$$

ÅDT farligt gods på vägen beräknas till 197 genom 4 % av ÅDT tung trafik (287 efter uppräknings till år 2040), ÅDT total enligt ovan.

Andelen farligt gods beräknas till $X = 3,73 \cdot 10^{-3}$.

Uppskattad andel singelolyckor (Y) kommer från beräkningsmatris för farligt godsolyckor som beror av hastighetsgräns och vägtyp som för aktuellt vägavsnitt utgörs av ringled i tätort med hastighetsgräns är denna 0,9.

Antal fordon skyltade med farligt gods i trafikolyckor / år =

$$= O \cdot ((Y \cdot X) + (1 - Y) \cdot (2 \cdot X - X^2)) = 1,65 \cdot 10^{-1} \text{ per år.}$$

Frekvensen för en trafikolycka med ett fordon skyltat med farligt gods är $1,65 \cdot 10^{-1}$ per år, vilket motsvarar en olycka med farligt gods ungefär vart 6:e år inom det studerade området.

Beräkningsbilaga

Frekvens för farligt gods-olycka fördelas sedan på respektive ADR-kategori enligt antagen fördelning som redovisas i huvudrapporten. Händelseträden för respektive ADR-kategori presenteras nedan.

1.3 Olycka explosiva ämnen

Beroende på fordonsklass kan olika mängder av klass 1 transporteras, vilket ger olika potentiella olycksscenarier. Med högsta fordonsklass kan maximal mängd massexplosiva varor transporteras i upp till 16 ton per transport, men de flesta transporter innefattar endast små nettomängder av massexplosiva varor. Olyckan som sker delas upp i 16 000 kg klass 1.1b respektive 20 kg klass 1.1a. Dessa får konservativt representera hela klass 1. Statistikunderlaget för klass 1 är begränsat. Men för analysen antas grovt att cirka 2 % av antal transporter har den maximala mängden 16 000 kg och resterande har 20 kg massexplosiva ämnen i klass 1.1a.

Reaktion i det explosiva materialet kan uppstå vid brand som sprider sig till lasten eller om godset utsätts för mycket kraftig stöt vid en kollision. Sannolikheten för såväl brand i fordonet som stötinitierad detonation bedöms vara beroende av fordonets hastighet vid olyckan. Sannolikheten för brand i fordon antas vara 1% för vägtypen med högst index för olycka med farligt gods från [9]. Det högsta värdet på index för olycka med farligt gods är 0,42 och index för olycka med farligt gods för den aktuella vägtypen är 0,11 [9]. Sannolikheten för brand i fordon för den aktuella vägtypen beräknas som:

$$0,01 * Index_{\text{aktuell vägtyp}} / Index_{\text{högst}} = 0,01 * 0,11 / 0,42 = 0,0026$$

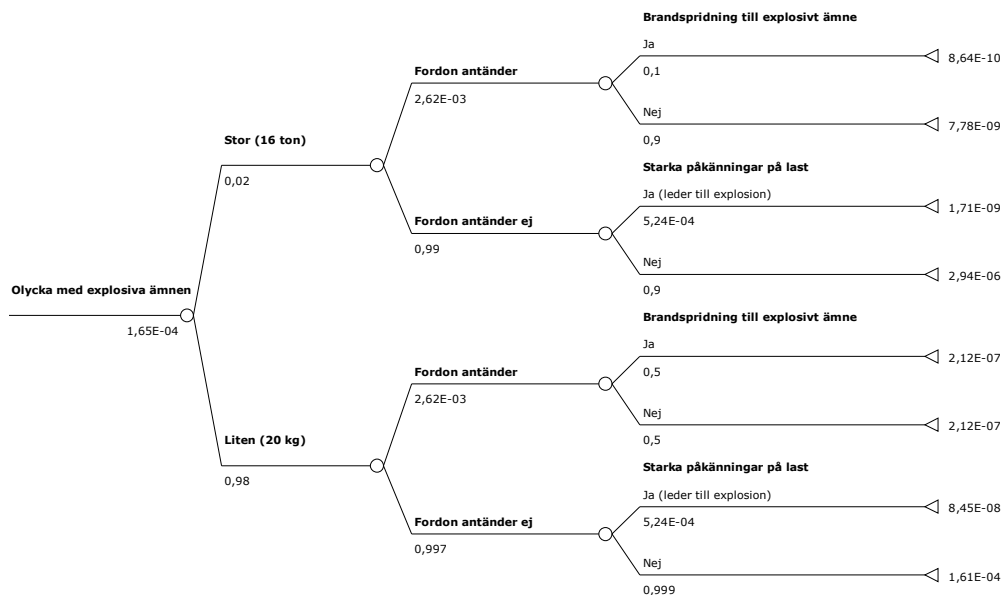
Det krävs kollisionshastigheter som uppgår till flera hundra m/s för att initiera en reaktion. HMSO [8] anger att sannolikheten för en stötinitierad detonation vid en kollision är mindre än 0,2%. Denna sannolikhet antas vara gällande för vägtypen med högst index för olycka med farligt gods från [9]. Det högsta värdet på index för olycka med farligt gods är 0,42 och index för olycka med farligt gods för den aktuella vägtypen är 0,11 [9]. Sannolikheten för stötinitierad detonation för den aktuella vägtypen beräknas som:

$$0,002 * Index_{\text{aktuell vägtyp}} / Index_{\text{högst}} = 0,002 * 0,11 / 0,42 = 0,00052$$

Sannolikheten att en brand i fordonet sprider sig till lasten beror av fordonsklass. Den högsta transporterade mängden förutsätter högsta fordonsklass. Utifrån detta antas en brand sprida sig till fordonet i 10 % av fallen för den maximala mängden 16 000 kg, och 50 % av fallen för 20 kg, vilket i praktiken är mycket konservativt.

Händelseträdet för olyckor med explosiva ämnen som ligger till grund för individ- och samhällsriskberäkningar presenteras i figur nedan.

Beräkningsbilaga



Figur 1-4. Händelseträd för olycka med explosiva ämnen.

1.4 Olycka brandfarlig gas

Det faktum att en behållare med farligt gods är inblandat i olycka innebär inte nödvändigtvis att ett läckage uppstår. I de flesta fall håller tanken och inget av innehållet strömmar ut. För tjockväggiga tankar som används för gaser med övertryck ansätts sannolikheten för läckage givet olycka till 0,37% i enlighet med [8]. Sannolikhet för läckage antas vara lika fördelat mellan stort och litet läckage. De skadehändelser som kan uppkomma givet ett utsläpp av brandfarlig gas är jetbrand, gasmolnsexplosion och BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

1.4.1 Jetbrand

En jetbrand uppstår då gas strömmar ut genom ett hål i en flaska och direkt antänds. Därmed bildas en jetflamma. Flammans längd beror av storleken på hålet i flaskan samt trycket i denna. Sannolikheten för direkt antändning beror på utsläppets storlek och ansätts i detta fall till följande [10]:

$S_{\text{direkt antändning litet läckage}} = 0,1$

$S_{\text{direkt antändning stort läckage}} = 0,2$

1.4.2 Gasmolnsbrand/explosion

Om gasen vid ett läckage inte antänds omedelbart uppstår ett brännbart gasmoln. Om gasmolnet antänds i ett tidigt skede är luftinblandningen vanligtvis inte tillräcklig för att en explosion ska inträffa. Förloppet utvecklas då till en gasmolnsbrand med diffusionsförbränning.

Om gasmolnet inte antänds omedelbart kommer luft att blandas med den brandfarliga gasen. Vid antändning kan en gasmolnsexplosion ske om gasmolnet består av en tillräckligt

Beräkningsbilaga

stor mängd gas/luft av en viss koncentration. För detta krävs som regel ett större läckage [10] men konservativt ansätts även en sannolikhet för mindre utsläpp. En gasmolnsexplosion kan beroende på vindstyrka och riktning inträffa en bit ifrån själva olycksplatsen. Explosionen blir i de allra flesta fallen av typen deflagration.

Sannolikheten för sen antändning sätts till:

$S_{\text{sen antändning litet läckage}} = 0,01$

$S_{\text{sen antändning stort läckage}} = 0,5$

För att gasmolnsexplosionen ska ge störst skada krävs att gasmolnet driver mot planområdet. Detta sker när vindriktningen är mot området. Med ovanstående antaganden konstrueras händelseträdet som presenteras i Figur 1-5.

1.4.3 BLEVE

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) är en händelse som kan inträffa om en tank med kondenserad brandfarlig gas utsätts för yttre brand. Trycket i tanken stiger och på grund av den inneslutna mängdens expansion kan tanken rämna. Innehållet övergår i gasfas på grund av den höga temperaturen och det lägre trycket utanför och antänds. Vid antändning bildas ett eldklot med stor diameter under avgivande av intensiv värmestrålning. För att en sådan händelse ska kunna inträffa krävs att tanken hettas upp kraftigt. Tillgänglig energi för att klara detta kan finnas i form av en antänd läcka i en annan närstående tank med brandfarlig gas eller vätska.

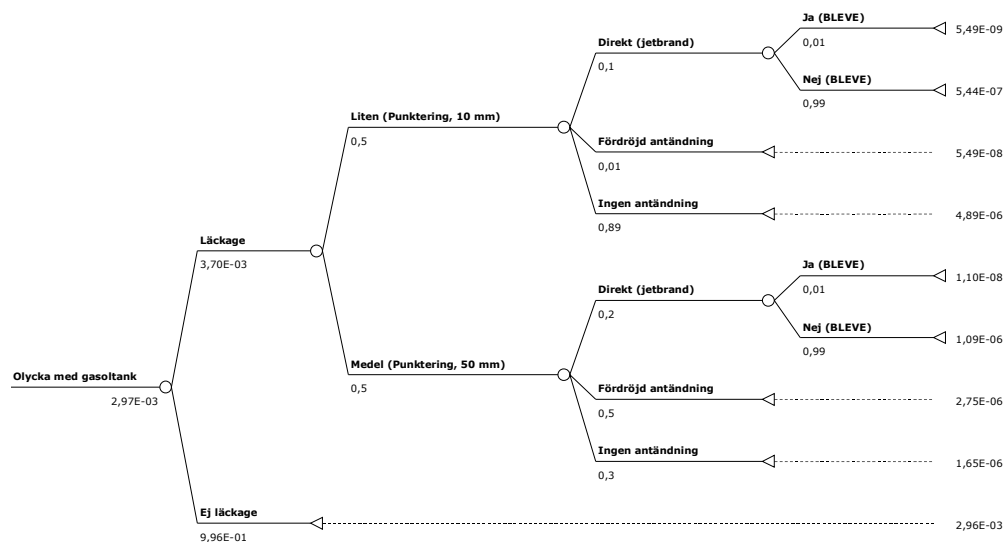
Eftersom gasmolnsbrand/gasmolnsbrand är kortvariga händelser bedöms BLEVE inte kunna inträffa i samband med dessa händelser. Däremot är en jetbrand mer långvarig och bedöms därför kunna orsaka BLEVE. Sannolikheten för BLEVE givet en jetbrand sätts till 1%.

I Tabell 1-3 visas frekvenser som används som indataparametrar i beräkningsprogrammet [1]. Av beräkningsprogrammets natur behöver BLEVE simuleras med en egen frekvens.

Tabell 1-3. Frekvenser för scenarier som involverar brandfarlig gas som används i beräkningsprogrammet [1].

Scenario	Frekvens [år ⁻¹]
Litet läckage	5,4E-06
Stort läckage	5,4E-06
BLEVE	1,6E-08

Beräkningsbilaga



Figur 1-5. Händelseträd med frekvenser vid olycksscenarion med brandfarlig gas.

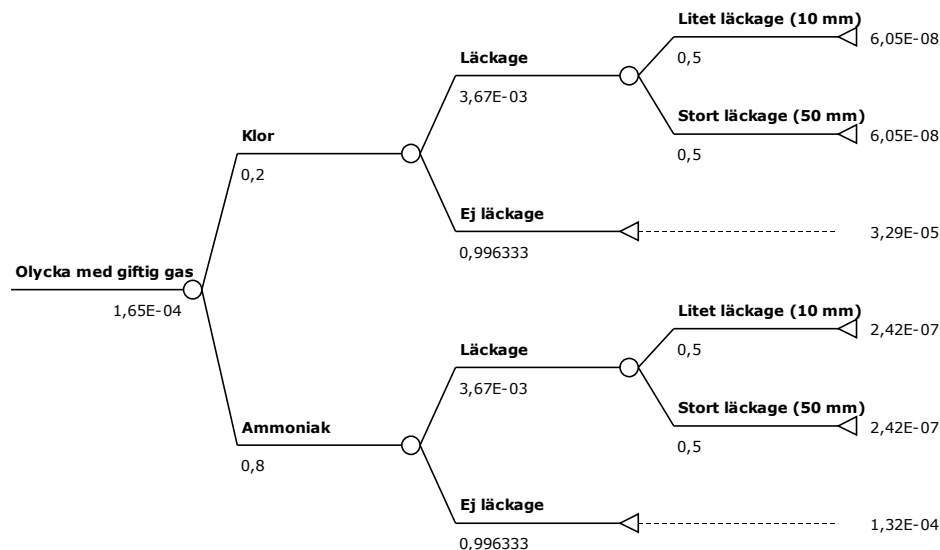
1.5 Olycka giftig gas

Vid ett utsläpp av giftig gas har vindstyrka och riktning en stor inverkan på konsekvenserna. Platsspecifika väderdata presenteras i tidigare avsnitt och inkluderas i konsekvensberäkningarna i beräkningsprogrammet [1].

Likt brandfarliga gaser så transporteras även giftiga gaser i tjockväggiga tankar. Vid en olycka med giftig gas ansätts därför samma sannolikhet för läckage som för en olycka med brandfarlig gas avseende hålstorlek och initial spridning då dessa transporteras under liknande förhållanden. Sannolikheten för läckage är således 0,37% och små respektive stora läckage antas vara lika fördelade. Stort läckage motsvarar en hålstorlek på 50 mm och litet läckage motsvarar en hålstorlek på 10 mm. Gaserna antas vara ammoniak (80 %) och klor (20 %).

Med ovanstående antaganden konstrueras händelseträden för olycka med giftig gas som presenteras i Figur 1-6.

Beräkningsbilaga



Figur 1-6. Händelseträd för olycka med läckage av giftig gas.

1.6 Olycka brandfarlig vätska

Klass 3 består av en rad olika brandfarliga vätskor; dels petroleumbaserade drivmedel såsom diesel, bensin, olika typer av eldningsoljor och även förnyelsebara drivmedel, samt dels andra typer av brandfarliga vätskor som exempelvis lösningsmedel, tändvätskor, parfymer och liknande.

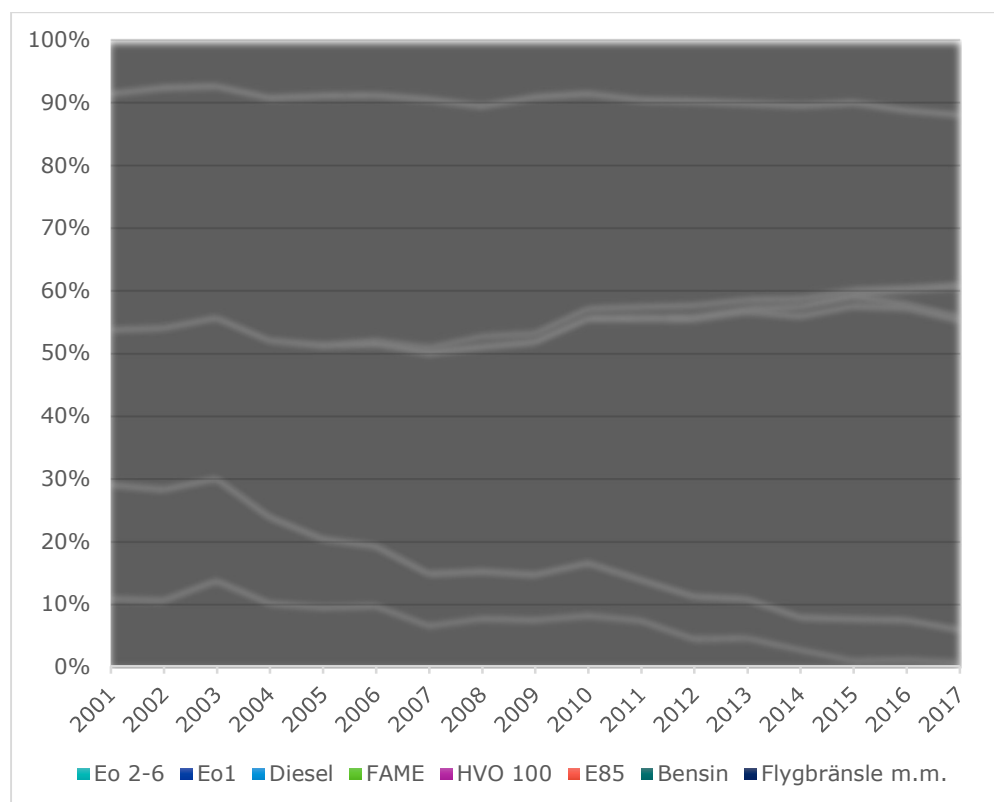
Den exakta fördelningen mellan petroleumbaserade drivmedel och andra brandfarliga vätskor är okänd. Det antas därför att hela klassen utgörs av drivmedel i brist på underlag om detta. Ett antagande om vilka eller vilket ämnen som kommer att beräknas avseende klass 3 i denna riskutredning, baseras därefter på statistik avseende utlevererade volymer av petroleumprodukter och förnybara drivmedel i Sverige. Statistiken kommer från Svenska Petroleum & Biodrivmedel Institutet, som bearbetat statistik från SCB och Energimyndigheten. Denna statistik antas gälla både för transporter på lastbil och järnväg. Fördelningen inom klass 3 visas i Tabell 1-4 och Figur 1-7.

Tabell 1-4. Fördelning inom drivmedel avseende utlevererade volymer av petroleumprodukter och förnybara drivmedel i Sverige (exkl. sjötransport utrikes). [11]

Fördelning av petroleumprodukter och förnybara drivmedel								
År	Eo 2-6	Eo1	Diesel	FAME	HVO 100	E85	Bensin	Flygbränsle m.m.
2001	11%	18%	25%	0%	0%	0%	38%	8%
2002	11%	18%	26%	0%	0%	0%	38%	7%
2003	14%	16%	26%	0%	0%	0%	37%	7%
2004	11%	14%	28%	0%	0%	0%	39%	9%
2005	10%	11%	31%	0%	0%	0%	40%	8%

Beräkningsbilaga

2006	10%	10%	32%	0%	0%	0%	39%	8%
2007	7%	8%	35%	0%	0%	1%	40%	9%
2008	8%	8%	36%	0%	0%	2%	37%	10%
2009	8%	7%	37%	0%	0%	1%	38%	9%
2010	9%	8%	39%	0%	0%	1%	34%	8%
2011	8%	7%	42%	0%	0%	2%	33%	9%
2012	5%	7%	44%	0%	0%	2%	33%	9%
2013	5%	6%	46%	0%	0%	1%	31%	10%
2014	3%	5%	48%	2%	0%	1%	31%	10%
2015	2%	7%	50%	2%	0%	1%	30%	10%
2016	2%	6%	50%	1%	2%	0%	28%	11%
2017	1%	5%	49%	1%	5%	0%	27%	11%



Figur 1-7. Fördelning inom drivmedel avseende utlevererade volymer av petroleumprodukter och förnybara drivmedel i Sverige (exkl. sjötransport utrikes). [11]

Som framgår av ovan är diesel den vanligaste transporterade drivmedlet och utgörs av ca 48 %. Därefter följer bensin med 27 % och flygbränslet med 11 %. Samtliga avser 2017 års siffror.

Beräkningsbilaga

Bensin bedöms vara det allvarligaste ämnet i termer av konsekvenser och avseende lättantändlighet inom drivmedlen. Detta på grund av att ämnet har en mycket låg flampunkt vilket ökar sannolikheten för att ångorna kan antändas i händelse av utsläpp. Flygbränslen och diesel hanteras båda under sina flampunkter, fast flygbränslen som fotogen har något kortare kolkedjor än diesel.

I denna utredning förenklas den stora spridningen av olika typer av drivmedlen till att endast bestå av bensin och resterande ämnen (diesel, flygbränsle osv.) Fördelningen utgår från siffror avseende 2017 enligt tabell och diagram ovan men har justerats något för att ta höjd för osäkerheter och bibehålla konservatism:

Resterande (representeras av n-dodekan): 0,60

Bensin (representeras av pentan): 0,40

Tankar för bensin etc. utförs för att klara transport av vätska under atmosfärstryck, så kallade tunnväggiga tankar, och sannolikheten att tanken skadas vid en olycka så att läckage sker är hastighetsberoende. Sannolikheten för läckage givet olycka är ansatt till 11% i enlighet med [8].

Tre olika utsläppsvolymer antas i utredning i enlighet med [2]. De tre volymerna ger olika potentiella pölstorlekar.

Tabell 1-5. Utsläppsvolymer med korresponderande pölstorlekar och sannolikheter som används i konsekvensberäkningarna för pölbränder. Indata gäller både pentan och dodekan.

Utsläppsvolym	Pölstorlek	Sannolikhet givet utsläpp
0,5 m³ Motsvarar ett mindre utsläpp	100 m ²	25 %
5 m³ Motsvarar en fackvolym	200 m ²	60 %
30 m³ Motsvarar hela tankvolymen	350 m ²	15 %

Ett konservativt antagande är att pölen trots lokala topografiska variationer är cirkulär, vilket ger upphov till högre flamma i beräkningarna och därigenom också en högre strålningseffekt som funktion av avståndet.

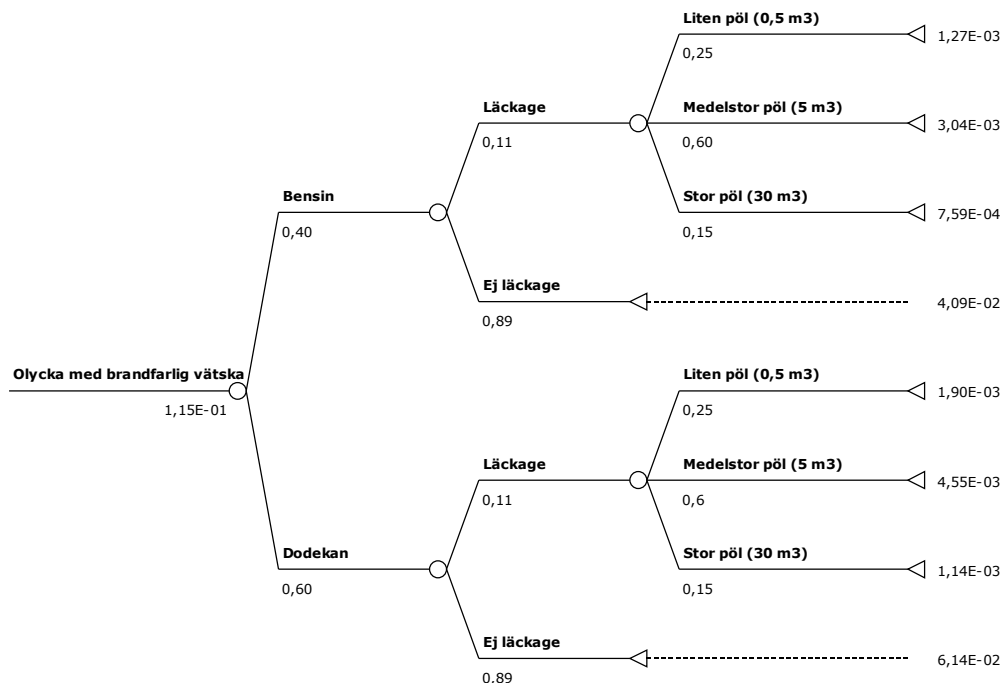
Sannolikheten för antändning av en pöl med brandfarlig vätska beror på om en antändningskälla finns i närheten av utsläppet, dels av utsläppets omfattning men även typen av utsläppt vätska. Bensin, pentan och etanol antänds t.ex. lättare än diesel, dodekan och eldningsolja. Sannolikheter för antändning som används i beräkningsprogrammet är i enlighet med [2]:

Beräkningsbilaga

Tabell 1-6. Antändningssannolikheter i frekvensberäkningarna för pölbrand av pentan respektive dodekan [2].

Brandfarlig vätska	Sannolikhet för direkt antändning	Sannolikhet för fördröjd antändning
Pentan (representerar bensin och andra lättantändliga vätskor)	6,5 %	6,5 %
Dodekan (representerar diesel, eldningsolja och andra svårantändliga vätskor)	0,43 %	-

Med ovanstående bedömningar kan händelseträdet konstrueras enligt Figur 1-8.



Figur 1-8. Händelseträd för olycka med brandfarlig vätska.

1.7 Olycka med oxiderande ämnen och organiska peroxider

Principiellt kan läckage av oxiderande ämnen (klass 5.1) eller organiska peroxider (klass 5.2) medföra brand eller explosion. Explosion är främst möjligt vid de fall det oxiderande materialet transporteras i höga koncentrationer och sammanblandas med organiskt material vid olyckan, exempelvis fordonets bränsle. För väteperoxid kan ämnet sönderfalla i koncentrationer över 20 vikt-% och ämnet är detonerbart vid koncentrationer över 90 %. Väteperoxid med koncentration under 60 % ger normalt inte upphov till några reaktioner som leder till tryckvåg [13].

Beräkningsbilaga

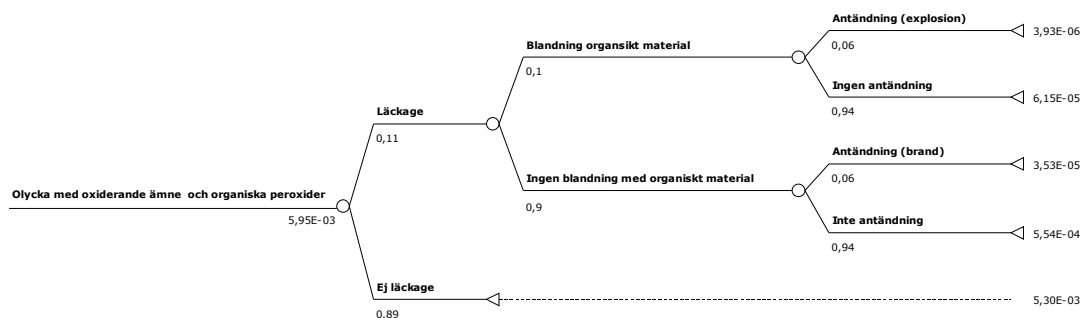
Avseende de typer av organiska peroxider (klass 5.2) som kräver kylda förhållanden kan även brand- och explosionsförlopp inträffa om kylningen på något sätt fallerar eller att ämnets SADT (Self-Accelerating Decomposition Temperature) överskrider, exempelvis av en extern brand. [14]

Tyvärr finns inga kända uppgifter om andelen av dessa mer farliga typer av klass 5.2 som andel av hela klass 5. På grund av bristande statistiskt underlag kring detta blir det därför svårt att uppskatta en fördelning delklasserna emellan. En erfarenhetsmässig bedömning är dock att olika koncentrationer av väteperoxid torde vara den vanligaste typen av ämne inom denna klass och att de organiska peroxiderna är mindre vanliga. Det antas därför grovt att hela klass 5 består av oxiderande ämnen.

Oxiderande ämnen transporteras i tunnväggiga tankar. Sannolikheten för läckage givet olycka ansätts till 11% i enlighet med [8]. Givet ett läckage antas sannolikheten för blandning av det oxiderande ämnet med organiskt material vara 10%. Om det oxiderande ämnet blandas med organiskt material antas sannolikheten för explosion vara 6%. Om det oxiderande ämnet inte blandas med organiskt material antas sannolikheten för brand vara 6%.

Brandscenarier med oxiderande ämnen antas konservativt ge liknande konsekvenser som för klass 3 brandfarlig vätska, varför dessa slutfrekvenser har adderats till slutfrekvenserna för liten pölbrand i klass 3. Brandscenarierna fördelas lika mellan små pölbränder av pentan och dodekan.

Explosionsscenarier med oxiderande ämnen antas ge liknande konsekvenser som för klass 1 explosivämnen, varför dessa slutfrekvenser har adderats till slutfrekvenserna för mindre explosion i klass 1.



Figur 1-9. Händelseträd för olycka med oxiderande ämnen och organiska peroxider.

Beräkningsbilaga

1.8 Summering frekvensberäkningar

Tabell 1-7. Summering av frekvensberäkningar.

Skadehändelse	Frekvens
Liten explosion (klass 1)	4,22E-06
Stor explosion (klass 1)	2,57E-09
Litet utsläpp av brandfarlig gas (klass 2.1)	5,44E-06
Stort utsläpp av brandfarlig gas (klass 2.1)	5,44E-06
BLEVE (klass 2.1)	1,63E-08
Litet utsläpp av giftig gas, ammoniak (klass 2.3)	2,42E-07
Stort utsläpp av giftig gas, ammoniak (klass 2.3)	2,42E-07
Litet utsläpp av giftig gas, klor (klass 2.3)	6,05E-08
Stort utsläpp av giftig gas, klor (klass 2.3)	6,05E-08
Litet utsläpp och pölbrand av diesel (klass 3)	6,01E-03
Mellanstort utsläpp och pölbrand av diesel (klass 3)	4,55E-03
Stort utsläpp och pölbrand av diesel (klass 3)	1,14E-03
Litet utsläpp och pölbrand av bensin (klass 3)	1,40E-03
Mellanstort utsläpp och pölbrand av bensin (klass 3)	3,03E-03
Stort utsläpp och pölbrand av bensin (klass 3)	7,58E-04

Beräkningsbilaga

2 Bilaga B – Konsekvensberäkning

I denna riskutredning har konsekvens- och frekvensberäkningar gjorts med programvaran Riskcurves [1]. Programmet har tagits fram av The Netherlands Organisation for applied scientific research (TNO) som är ett oberoende forskningsinstitut. Konsekvensberäkningar i föreliggande studie baseras till stor del på de källor som används i Riskcurves [15]. Där dessa frångås nämns detta uttryckligen.

2.1 Generella skadekriterier

I beräkningar har hänsyn tagits till varierande persontäthet dag- och nattetid, samt att persontätheten varierar beroende på avstånd till riskobjektet. Dessa antaganden redovisas i huvudrapporten. Nedan redogörs för övriga antaganden som gjorts för beräkning av antalet omkomna vid olika skadehändelser.

Tabell 2-1. Skadekriterier som används i beräkningarna.

Parameter	Värde	Kommentar
Mottagarhöjd Z_d (m)	1,5	
Letal fraktion inom flamma eller gasmolnsbrand	100 %	
Värmestrålningsnivå vid total destruktion (kW/m^2)	35	
Letalitet vid total destruktion (inomhus och utomhus) (-)	100 %	
Maximal exponeringstid för värmestrålning, (s)	20	
Probit funktion, värmestrålning	$\text{Pr} = -36,38 + 2,56 \ln(q_{1,33}) \cdot t$	q = värmestrålningen i W/m^2 och t = exponeringstiden i sekunder, [16]
Peak tryck för total destruktion (inomhus och utomhus) (mbar)	300	
Peak tryck för letalitet inomhus på grund av glassplitter (mbar)	100	
Letalitet av glassplitter (-)	0,025	
Inomhus:utomhus letalitet av toxisk effekt (-)	0,1	
Maximal tid till personer har satts i säkerhet (s)	1800	

Beräkningsbilaga

2.2 Olycka med explosiva ämnen

Människor som exponeras för en explosion utsätts för en tryckhöjning som är skadlig över vissa gränsvärden. Konsekvenserna av explosioner representeras av resulterande övertryck i tryckvågen och den effekt den har på personerna i planområdet.

Människors skador utgörs i första hand av skador på trumhinnor, därefter påverkas lungor och andra inre organ och dödliga skador kan uppkomma. I Tabell 2-2 nedan redovisas uppgifter på skador på människor vid olika tryckskillnader när de exponeras för en explosion utomhus [17].

Tabell 2-2. Gränsvärden för skador på människor vid explosionsövertryck utomhus.

Skada	Infallande tryck (kPa)
Gräns för lungskador (alla skadade)	70
Gräns för dödliga skador (1% döda)	180
10% döda	210
50% döda	260
90% döda	300
99% döda	350

För individriskkurvan används värdet där 1 % förväntas omkomma, 180 kPa vilket är konservativt med en faktor 100.

Människor kan också omkomma om de vistas inomhus i en byggnad som kollapsar på grund av övertryck och draglasters påverkan på bärverket. Typiska värden för byggnadsverks tålighet visas i Tabell 2-3. Moderna fönster antas gå sönder vid 10 kPa. För byggnadsstommar antas 20 kPa.

Tabell 2-3. Gränsvärden för skador på byggnadsstomme för olika konstruktioner.

Byggnadsmaterial	Trycktålighet
Träbyggnader och plåthallar	10 kPa
Tegel- och äldre betonghus	20 kPa
Nyare betonghus	40 kPa

För analysen av konsekvenser som omfattar explosiva ämnen används standardberäkning enligt TNT-ekivalentmetoden i "Yellow book" [15]. Det massexplosiva ämnet representeras av TNT, varvid massan TNT räknas om till ekvivalent massa brännbar metangas i ett hypotetiskt gasmoln. Trycket från gasmolnsexplosion beräknas därefter.

Vi söker därför den massa av brännbar gas som motsvarar en bestämd mängd TNT från nedanstående samband:

$$m_{gas} = \frac{m_{TNT} \cdot \Delta H_{d(TNT)}}{\Delta H_{c(gas)} \cdot Y}$$

Beräkningsbilaga

Där

m_{gas} = ekvivalent massa gas i brännbart gasmoln som bidrar till gasmolnsexplosion [kg]

m_{TNT} = massa TNT [kg]

$\Delta H_c(\text{gas})$ = förbränningsvärme gas [J/kg]

$\Delta H_d(\text{TNT})$ = förbränningsvärme TNT [J/kg]

Y = effektivitetsfaktor [-]

Effektivitetsfaktorn Y beror på gasens reaktivitetsgrad och anges i [15] till

$Y = 0.2$

$\Delta H_c(\text{CH}_4) = 5,6\text{E}+07$ [J/kg]

$\Delta H_d(\text{TNT}) = 4,18\text{E}+06$ [J/kg]

Med ovanstående formel kan massan TNT omvandlas till ekvivalent massa metangas enligt Tabell 2-4.

Tabell 2-4. TNT-ekvivalenter av metan.

Massa TNT [Kg]	Massa CH ₄ [Kg]
20	7,5
16 000	5970

För att kunna bestämma trycket vid olika avstånd från explosionens centrum bestäms ett dimensionslöst avstånd enligt formeln nedan [17].

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

Där

$\bar{R}$ = Dimensionslöst avstånd [-]

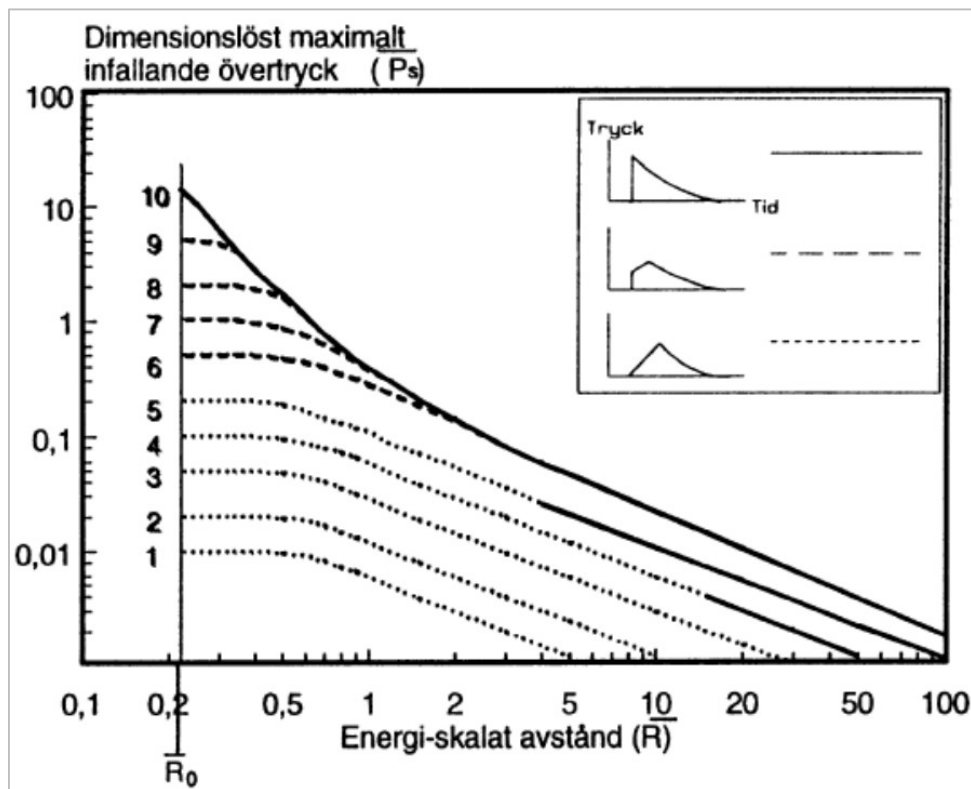
R = Verkligt avstånd från explosionens centrum [m]

E = Energimängd i gasmolnet [J]

P_0 = Atmosfärstryck [Pa]

Därefter kan det dimensionslösa trycket bestämmas med hjälp av Figur 2-1 nedan [17].

Beräkningsbilaga



Figur 2-1. Maximalt dimensionslöst tryck. För beräkningarna har den högsta detonationsklassen (10) antagits för liten mängd TNT och detonationsklass 9 för den stora mängden TNT, då de olika underklasserna i klass bäst stämmer överens med dessa utseenden i tryck-tids sambandet.

Med hjälp av det dimensionslösa trycket utläst ur Figur 2-1 kan explosionsövertrycket bestämmas genom

$$\bar{P} = \frac{P_s}{P_0}$$

Där

$\bar{P}$ = Dimensionslöst tryck [-]

P_s = Explosionstryck [Pa]

P_0 = Atmosfärstryck [Pa]

Trycket beräknas för respektive avstånd vilket ger avstånd till kritiskt tryck enligt Tabell 2-5.

Beräkningsbilaga

Tabell 2-5. Potentiellt avstånd till 180 kPa med massexplosivt ämne.

Massa TNT [kg]	Avstånd till dödsfall [m]
20	8
16 000	65

Antalet döda i olycka med explosivämnen kan nu bestämmas genom att jämföra personbelastningen med de aktuella övertrycken i området, Tabell 2-5 och gränsvärden för skador på människor från Tabell 2-2.

Avståndet till 50% döda för 20 kg explosivämne sätts till 10 m för individrisken, medan nivån för 16 000kg beräknas till 40 m.

Tryck över 10 kPa antas få glas/fönsterrutor att gå sönder, tryck över 20 kPa antas få bärverk att kollapsa generellt. Byggnadsdelar som först exponeras för explosion antas absorbera en del av energin. För att få fler datapunkter har gränsvärdet för 1% döda (180 kPa) istället antagits ge 10 % döda.

2.3 Olycka brandfarlig gas

Mängden brandfarlig gas i ett släp antas vara ca 40 m³. Beräkningarna anses vara giltiga för både järnväg och olycka på motorväg. För motorväg bedöms detta vara ett konservativt antagande, och mer rimligt för transport på järnväg.

Vidare antas att det är tryckkondenserad propan (gasol) som transporteras eftersom det har en låg brännbarhetsgräns och medföra att antändning kan inträffa på ett längre avstånd från olycksplatsen än med andra gaser.

Två olika utsläppsstorlekar (för jetflamma och gasmoln) antas enligt följande:

- Litet - punktering (hålstorlek 10 mm)
- Stort - medelstort hål (hålstorlek 50 mm)

I tillägg simuleras även BLEVE men i konsekvensberäkningarna är händelsen oberoende av hålstorlek.

För jetflamma och brinnande gasmoln varierar skadeområdet med läckage-storlek, tiden till antändning samt vindhastighet. Beroende på om läckage inträffar i tanken i gasfas, i gasfas nära vätskefas eller i vätskefas kan utsläppets storlek och konsekvensområde variera. I beräkningarna antas att utsläppet sker i vätskefasen. Dels ger detta de största konsekvenserna och dels anses detta det mest troliga i händelse av olycka med brandfarlig gas.

Som nämns i huvudrapporten används beräkningsprogrammet Riskcurves [1] för konsekvensberäkningar. De indata som används i programmet för att simulera konsekvensområden för jetflamma, gasmoln och BLEVE presenteras nedan:

- Lagringstemperatur: 9°C
- Lagringstryck: 6,2 bar (absolut tryck)
- Utströmningkoefficient (Cd): 0,62 (skarpa kanter)
- Tanklängd (horisontell cylinder): 7 m
- Tankfyllnadsgrad: 80 %

Beräkningsbilaga

- Bristningstryck: 25 bar (inneboende tryck då tanken brister vid en BLEVE)
- Lufttryck: 1 atm
- Omgivningstemperatur: 9°C
- Relativ fuktighet: 83 %
- Molnighet: 75 % (halvklart till molnigt)
- Omgivning: Många träd, häckar och enstaka hus
- Väderparametrar enligt tidigare avsnitt
- Fraktion gasmoln som deltar i explosion 0,4

Tabell 2-6. Avstånd för relevanta skadehändelser med brandfarlig gas beroende på väderförhållanden. Beräkningarna är gjorda med programvaran [1]. Konsekvenserna vid en BLEVE är i praktiken oberoende av väderförhållandena, varför de presenteras i en separat tabell.

Konsekvens	Relevant skadehändelse	Ungefärliga avstånd till konsekvens beroende på väderförhållanden [m]		
		D5	D2	F2
100 mbar övertryck	Gasmolns-explosion	100	124	158
20 kW/m ² värmestrålning	Jetbrand	97	110	113
15 kW/m ² värmestrålning	Jetbrand	102	114	118
10 kW/m ² värmestrålning	Jetbrand	110	122	125
Avstånd till UFL (upper flammability limit)	Kortaste avstånd till antändbart gasmoln	23	23	27
Avstånd till LFL (lower flammability limit)	Längsta avstånd till antändbart gasmoln	77	93	138
Avstånd till 50 % av LFL	-	124	158	266

Tabell 2-7. Konsekvensavstånd för BLEVE.

Konsekvens	Konsekvensavstånd BLEVE [m]
20 kW/m ² värmestrålning	206
15 kW/m ² värmestrålning	251
10 kW/m ² värmestrålning	321

2.4 Olycka giftig gas

Spridningsberäkningar för giftiga gasmoln har gjorts i programvaran [1].

Spridningssimuleringar har gjorts för giftiga gaser (representerat av ammoniak) och mycket giftiga gaser (representerat av klor). Väderförhållandena som råder vid tiden för utsläppet påverkar konsekvenserna i stor utsträckning. Dessa data presenterades i tidigare avsnitt. Samma hålstorlekar har använts som för brandfarliga gaser, det vill säga 10 och 50 mm.

Beräkningsbilaga

För att beräkna konsekvensområdets utbredning används Acute Exposure Guideline Level (AEGL). AEGL-1-3 avser en exponeringsnivå av luftburna partiklar där en individ (inklusive känsliga individer) kan uppleva besvär, kan få irreversibla hälsoeffekter och drabbas av livshotande skador/död. AEGL-3 utgör den nivå där känsliga individer kan omkomma och används också i beräkningarna. AEGL-3 för ammoniak avseende 30 minuters exponering är 1600 ppm [18]. AEGL-3 för klor avseende 30 minuters exponering är 28 ppm. Varaktigheten är avgörande för dosen, d.v.s. kort utsläppstid medför hög koncentration men kort påverkanstid.

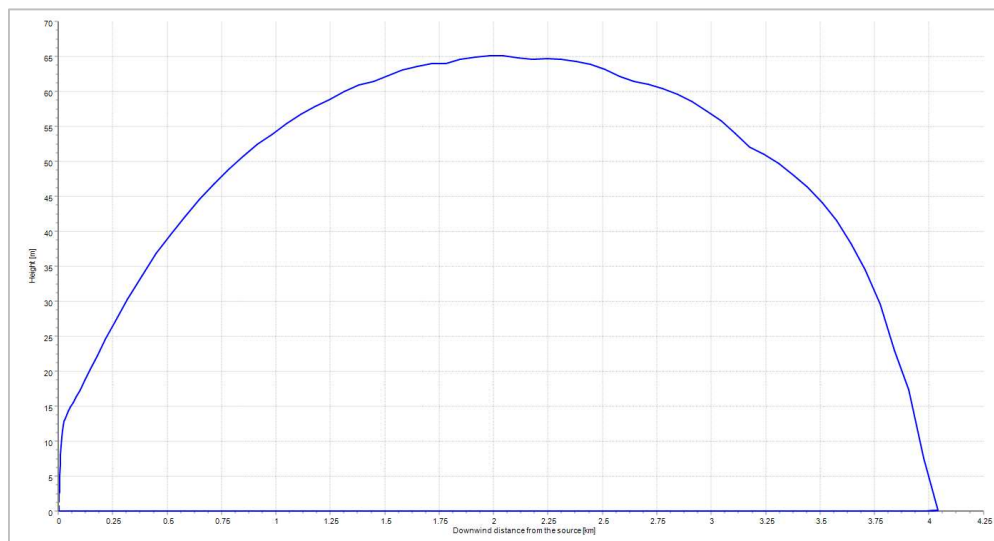
Påverkan inomhus bedöms reduceras med en faktor tio, enligt vad som anges i Purple Book [2]. Om friskluftsintag placeras vid fasad bort från vägen uppskattas påverkan inomhus reduceras ytterligare med en faktor tio. De indata som används i programmet [1] för att simulera konsekvensområden utsläpp av giftig gas presenteras nedan:

- Lagringstemperatur: 9°C
- Lagringstryck klor: 10 bar (absolut tryck)
- Lagringstryck ammoniak: 10 bar (absolut tryck)
- Liten håldiameter: 10 mm
- Stor håldiameter: 50 mm
- Utströmningkoefficient (Cd): 0,62 (skarpa kanter)
- Tankdiameter (horisontell cylinder): 3,8 m
- Tanklängd (horisontell cylinder): 7 m
- Tankfyllnadsgrad: 80 %
- Lufttryck: 1 atm
- Omgivningstemperatur: 9°C
- Relativ fuktighet: 83 %
- Molnighet: 75 % (halvklart till molnigt)
- Omgivning: Många träd, häckar och enstaka hus
- Väderparametrar enligt tidigare avsnitt

Tabell 2-8. Avstånd till AEGL-3-värdet (30 min exponering) för respektive utsläppsscenario och väderförhållande.

Relevant skadehändelse	Ungefärliga avstånd till konsekvens beroende på väderförhållanden [m]		
	D5	D2	F2
Litet ammoniakutsläpp	118	165	344
Stort ammoniakutsläpp	788	928	1873
Litet klorutsläpp	665	1057	3492
Stort klorutsläpp	4050	6094	12749

Beräkningsbilaga



Figur 2-2. Konsekvensberäkning av stort klorutsläpp vid väderscenario D5. Konturen avser avstånd till nivåer för AEGL-3 (30 minuters exponering) utomhus.

2.5 Olycka brandfarlig vätska

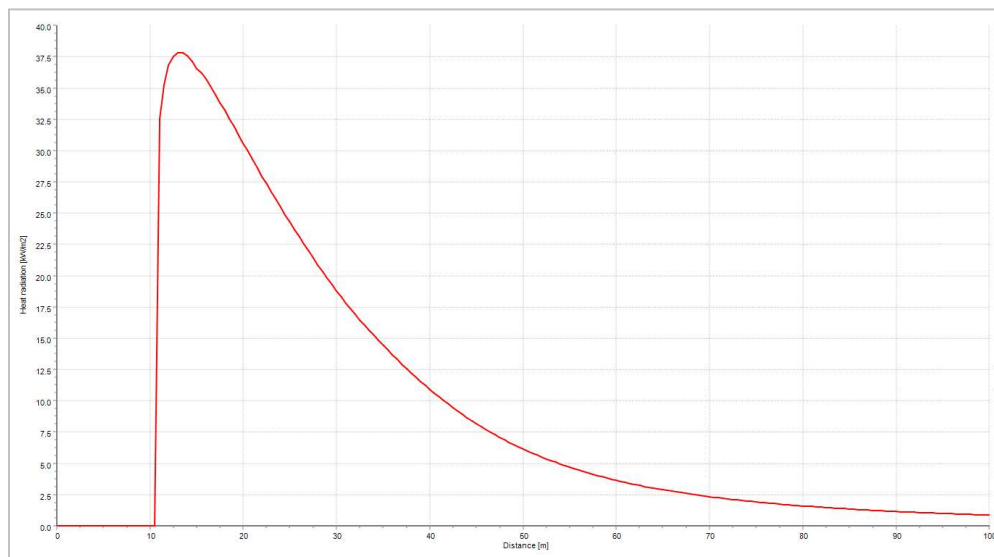
I konsekvensberäkningen används bensen, som representeras av pentan, och dodekan ($C_{12}H_{26}$) för att modellera resterande brandfarliga vätskor (dvs diesel, flygbränslen). En cirkulär pöl används i konsekvensberäkningarna, vilket är ett konservativt antagande då detta ger högre värmestrålning i jämförelse med en avlång pöl som kanske skulle efterspegla verkligheten på ett rimligare sätt. I Tabell 2-9 redovisas de utsläppsstorlekar med korresponderande pölstorlekar som använts vid beräkningarna tillsammans med de beräknade flamlängderna och avstånd till strålningsnivåer.

Tabell 2-9. Utsläppsstorlekar med korresponderande pölstorlekar samt beräknade flamlängder beroende på väderförhållanden och avstånd till olika strålningsnivåer.

Ämne	Volym [m ³]	Pölstorlek [m ²]	Flamlängd [m]			Avstånd [m]		
			D5	D2	F2	10 kW/m ²	15 kW/m ²	20 kW/m ²
Bensin/ pentan	0,5	100	19	23	23	24	19	16
	5	200	25	29	29	32	26	22
	30	350	30	34	35	41	33	28
Dodekan / diesel	0,5	100	12	14	14	19	16	13
	5	200	15	19	19	25	21	18
	30	350	19	23	23	32	27	23

I Figur 2-3 redovisas konsekvensberäkning för pölbrand på 30 m³ med pentan (bensin) för väderscenario D5.

Beräkningsbilaga



Figur 2-3. Konsekvensberäkning för värmestrålning som konsekvens av avståndet från utsläppskällan. Avser stor pölbrand (30 m³) med pentan (bensin) och väderscenario D5.

2.6 Olycka med oxiderande ämne

De två konsekvenserna av olycka med klass 5, som approximeras med oxiderande ämnen, är pölbrand och explosion. Pölbränderna antas fördela sig enligt samma konsekvenser som för små läckage av brandfarlig vätska, klass 3. Brandscenarierna fördelas lika mellan små pölbränder av pentan och dodekan. Explosionsförloppet approximeras till detsamma för en mindre explosion av farligt gods klass 1.

Beräkningsbilaga

Referenser

- [1] TNO Riskcurves, "RISKCURVES 10.1.9.12276," 2018. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/circular-economy-environment/roadmaps/environment-sustainability/public-safety/riskcurves-software-for-quantitative-risk-assessment/>.
- [2] TNO Purple Book, "Guidelines for quantitative risk assessment "Purple book", " 2005b. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/circular-economy-environment/roadmaps/environment-sustainability/public-safety/the-coloured-books-yellow-green-purple-red/>.
- [3] SMHI, "Öppna data," 04 09 2018. [Online]. Available: <http://opendata-download-metobs.smhi.se/explore/#>.
- [4] FOI, "Osäkerheter i observationer och beräkningar," Totalförsvarets forskningsinstitut., FOI-R--3764--SE, 2013.
- [5] VTI, "Konsekvensanalys av olika olycksscenarier vid transport av farligt gods på väg, VTI-rapport 387:4," Väg- och trafikforskningsinstitutet, 1994.
- [6] Trafikverket, "Nationellvägdatabas," 09 05 2017. [Online]. Available: <https://nvdb2012.trafikverket.se/>.
- [7] Trafikverket, "Trafikuppräkningsstal väganalys," Trafikverket, Borlänge, 2018a.
- [8] HMSO, "Major Hazard aspects of the transport of dangerous substances," Advisory Committee on Dangerous Substances Health & Safety, London, 1991.
- [9] S. Fredén, "Modell för skattning av sannolikheten för järnvägsolyckor som drabbar omgivningen,, " Banverket, Borlänge, 2001.
- [10] G. Purdy, "Risk analys of the transportation of dangerous goods by road and rail," Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam, 1993.
- [11] SPBI, "Utlevererad volym av oljeprodukter och förnybara drivmedel," 2018.
- [12] Räddningsverket, "Farligt gods - Riskbedömning vid transport," 1996.
- [13] MSB, SÄIFS 1999:2 - Föreskrifter och allmänna råd om hantering av väteperoxid, 1999.
- [14] MSB, SÄIFS 1996:4 - Föreskrifter och allmänna råd om hantering av organiska peroxider, 1996.
- [15] TNO Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects "Yellow Book", The Hague, 2005a.

Beräkningsbilaga

- [16] TNO Green Book, "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials Green Book," 1992. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/circular-economy-environment/roadmaps/environment-sustainability/public-safety/the-coloured-books-yellow-green-purple-red/>.
- [17] FOA, "Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor - Metoder för bedömning av risker," 1998.
- [18] EPA, "Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGs) Values," 29 08 2016. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl/access-acute-exposure-guideline-levels-aegls-values#chemicals>.
- [19] UCI, "Structures built over railway lines - Construction requirements in the track zone," UIC, 2002.
- [20] Green Cargo, "Tala om lågt hängande frukter," 2018.
- [21] Räddningsverket, Kartläggning av farligt godstransporter - September 2006, MSB, 2006.
- [22] Outokumpu Stainless AB, *Uppgifter från verksamheten i Nyby bruk, Torshälla*, 2020.
- [23] Trafikverket, "Prognos för godstransporter 2040 – Trafikverkets Basprognoser 2018," Publikationsnummer: 2018:087, 2018.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency, "Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4," Committee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, National Research Council, 2004.