



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Riskbedömning som underlag för MKB

Bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i Katarinaberget
Stockholm

2016-12-09

Slutgiltig handling

Uppdragsgivare

Exploateringskontoret
Stockholms stad
Box 8189
104 20 Stockholm

WSP kontaktperson

Johan Lundin
121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000
Fax: +46 10 7226345
WSP Sverige AB
Org nr: SE556057488001
Styrelsens säte: Stockholm
<http://www.wspgroup.se>

Dokumenthistorik och kvalitetskontroll

Utgåva/revidering	Utgåva 1	Revision 1	Revision 2	Revision 3
Datum	2016-12-09			
Handläggare	Maria Persson Jenny Axelsson			
Signatur				
Granskare	Björn Yndemark			
Signatur				
Godkänd av	Johan Lundin			
Signatur				
Uppdragsnummer	10210098			

Sammanfattning

WSP har av Stockholms stad fått i uppdrag att i samband med detaljplaneprocessen göra en riskbedömning som underlag till miljökonsekvensbeskrivning (MKB) för ny bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i Katarinaberget. Riskbedömningen syftar till att uppfylla de krav på analys och värdering av risker som finns i plan- och bygglagen (PBL). Målet är att bedöma den föreslagna markanvändningens lämplighet med hänsyn till människors hälsa och säkerhet utifrån risk- och säkerhetssynpunkt enligt PBL kap 1, §§ 4 och 5 samt PBL kap 2, § 6. Finns behov av att genomföra riskreducerande åtgärder skall sådana föreslås.

I denna riskbedömning har riskerna kartlagts i en riskinventering som tar utgångspunkt i underlag som upprättats vid framtagande av en systemhandling för bussterminalen, från tidigare skeden i planprocessen, synpunkter från samrådande myndigheter och allmänheten samt kompletterande utredningar. Storleken på dessa risker har sedan uppskattats och värderats. Följande huvudsakliga områden har utretts: brand- och explosionsscenarier i bussterminalen, antagonistiska handlingar samt risker utanför bussterminalen.

Riskerna har analyserats både kvalitativt och kvantitativt för nuläget, huvudalternativet (planförslaget) samt ett nollalternativ. En vedertagen bedömningsgrund för att bedömma denna typ av riskpåverkan i aktuell anläggning saknas. I detta projekt definieras bedömningsgrunden med olika typer av kriterier, som anpassats till både risktyp och analysmetod. Ett projektspecifikt kvantitativt acceptanskriterium, dvs. ett säkerhetsmål, har tagits fram för bussterminalen som en del av bedömningsgrunden. Mot detta värderas de framräknade risknivåerna. En rimlighetskontroll har utförts vilken visar på att säkerhetsmålets risknivå är lägre eller i samma storleksordning som för många andra motsvarande risker i samhället, t.ex. i andra transportsystem såsom moderna trafiktunnlar. Säkerhetsmålet har tagits fram i samverkan mellan Stockholm stad och Trafikförvaltningen i Stockholms läns landsting, samt fastställts av Trafikförvaltningen, som är den framtida verksamhetsutövaren.

Både nuläge, huvudalternativet och nollalternativet omfattar en stor mängd risker av olika slag. Bland de identifierade riskerna framkommer trafikering av anläggningen med bussar som drivs med fordonsgas som en av de mest påtagliga riskerna. Samtidigt är praxis och erfarenhet av att hantera denna typ av risk i undermarksanläggningar begränsad. Därför har en fördjupad riskanalys avseende fordonsgas genomförts, vilken biläggs denna rapport.

Sammanfattningsvis medför trafikering med fordonsgasbussar i bussterminalen en hög men acceptabel risknivå för huvudalternativet, som innebär att riskreducerande åtgärder behöver vidtas. Dessa riskreducerande åtgärder sammanfattas i ett säkerhetskoncept. De åtgärdsförslag som nu finns i projekteringen visar på en acceptabel skyddsnivå i bussterminalen, där både tekniska och organisatoriska åtgärder är väl tilltagna, men pekar även på behov av fortsatt arbete med att minska riskerna i driftskedet. I nollalternativet sker trafikering med bussar som drivs av fordonsgas, men bytespunkten förläggs utomhus. Även denna utformning av bytespunkt medför betydande riskpåverkan.

Mot bakgrund av riskbedömningen dras följande slutsatser:

- Den i detaljplanen föreslagna markanvändningen uppfyller säkerhetsmålet förutsatt att föreslagna åtgärder som sammanfattas i ett säkerhetskoncept genomförs. Det innebär en förhöjd med acceptabel risknivå för huvudalternativet, vilken hamnar i nivå med andra moderna trafikplanläggningar. Det innebär också ett behov av fortsatt arbete med riskreduktion.
- Både huvudalternativet och nollalternativet bedöms medföra en lägre risknivå än nuläget, främst till följd av påkörningsrisk för gång- och cykeltrafikanter samt bussresenärer i nuläget.
- Riskpåverkan i både huvudalternativet och nollalternativet bedöms vara likartad och inte överskrida acceptabla nivåer (säkerhetsmålet) givet att lämpliga åtgärder genomförs.

Innehåll

1	Inledning	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Syfte och mål	5
1.3	Avgränsningar	5
1.4	Styrande dokument	6
1.5	Underlag	7
1.6	Kvalitetssäkring	7
2	Omfattning av riskhantering och metod	8
2.1	Begrepp och definitioner	8
2.2	Riskanalysmetoder	8
2.3	Riskhantering i MKB- och planprocessen	9
2.4	Metod för riskuppskattning	11
2.5	Bedömningsgrund – metod för riskvärdering	14
2.6	Metod för identifiering av riskreducerande åtgärder	18
3	Nuläget	19
4	Huvudalternativet (planförslaget)	20
4.1	Översiktlig beskrivning av bussterminalen	20
4.2	Projekterade säkerhets- och skyddsåtgärder	22
5	Nollalternativet	26
6	Riskinventering och riskidentifiering	27
6.1	Medverkande intressenter	27
6.2	Resultat av riskidentifiering för nuläget	27
6.3	Resultat av riskidentifiering för huvudalternativet	28
6.4	Resultat för riskidentifiering för nollalternativet	28
7	Riskuppskattning	30
7.1	Riskuppskattning för nuläget	30
7.2	Riskuppskattning för huvudalternativet	32
7.3	Riskuppskattning för nollalternativet	40
8	Riskvärdering	44
8.1	Riskvärdering för nuläget	44
8.2	Riskvärdering för huvudalternativet	46
8.3	Riskvärdering för nollalternativet	49
9	Övergripande samlad värdering av alternativen	52
10	Jämförelse mellan alternativen	53
11	Riskreducerande åtgärder	54
12	Osäkerheter	56
12.1	Identifiering av osäkerheter	56
12.2	Hantering av osäkerheter	56
12.3	Fortlöpande riskhanteringsarbete	57
13	Slutsatser	58
14	Referenser	59
	Appendix A – Riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal	61

1 Inledning

WSP har av Stockholms stad, Projekt Slussen, fått i uppdrag att göra en riskbedömning i samband med upprättande av miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Riskbedömningen avser beskriva riskbilden för planområdet, och därmed utgöra en grund för att bedöma om detaljplanen medför lämplig markanvändning med hänsyn till människors hälsa och säkerhet.

1.1 Bakgrund

Ny detaljplan för bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i Katarinaberget är under utveckling. Planen syftar till att möjliggöra en bussterminal vid Slussen för kommunikationer mellan Nacka och Värmdö kommun och kollektivtrafiknoden Slussen. Parallellt med detaljplanen för bussterminalens framtagande har genomförandet av lagakraftvunnen detaljplan för Slussenområdet påbörjats. Denna detaljplan omfattar en omfattande modernisering av området inklusive slussarna för en ny reglering av Mälaren. Den nya detaljplanen för Slussen innebär att den befintliga bussterminalen vid Slussen måste rivas. Innan en ny permanent bussterminal har anlagts i Katarinaberget planeras en temporär bussterminal på kaj alternativt ponton vid Stadsgårdsleden. Den temporära bussterminalen och dess konsekvenser har beskrivits inom ramen för planprocessen för detaljplanen för Slussen och pontonlösningen har prövats som en del av det lagakraftvunna tillståndet för vattenverksamheten för Slussen.

I den behovsbedömning som Stockholms stad upprättat för detaljplanen för bussterminalen i Katarinaberget (1) har risk och säkerhet bedömts utgöra en av de aspekter som kan ge upphov till betydande miljöpåverkan och som därmed behöver utredas närmare.

1.2 Syfte och mål

Denna riskbedömning utgör ett underlag till miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) för detaljplan för ny bussterminal i Katarinaberget. Syftet är att riskbedömningen ska ligga till grund för bedömning av markens lämpligheten utifrån risk- och säkerhetssynpunkt enligt PBL kap 1, §§ 4 och 5 samt PBL kap 2, § 6.

Målet med riskbedömningen är att kartlägga, analysera, värdera risken för bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna vid Slussen med hjälp av det underlag som upprättats vid framtagande av systemhandlingen (2), underlag från tidigare skeden i planprocessen, synpunkter från samrådande myndigheter samt kompletterande fördjupande utredningar. Målet är vidare att vid behov identifiera riskreducerande åtgärder.

1.3 Avgränsningar

Vad gäller riskpåverkan på naturmiljön har detta i behovsbedömningen inte bedömts utgöra en stor risk. I denna riskbedömning behandlas dock påverkan från släckvatten översiktligt, eftersom frågan om släckvattenhantering tidigare lyfts av Storstockholms brandförsvaret som en punkt som bör beaktas i riskbedömningen.

Denna riskbedömning omfattar endast plötsligt inträffade livshotande händelser under bussterminalens driftskede. Byggskedet medför risker kopplat till exempelvis sprängning för bussterminalen. En särskild riskanalys finns framtagen för byggskedesrisker (3), vilken sammanfattas övergripande i MKB:n.

Händelser där långvarig exponering krävs för skadliga konsekvenser och eventuella skador på egendom är således exkluderade i denna analys liksom olyckor likt klämskador och fallolyckor som är arbetsmiljörelaterade. Effekter förknippade med översvämning, erosion (ras och skred) presenteras ingående i MKB för reglering av Mälaren. (4) (5)

Riskbedömningen tar utgångspunkt i behovsbedömningens beskrivning och det geografiska området för den föreslagna detaljplanen för huvudalternativet. För nuläge och nollalternativ utförs riskbedömningen för ett verksamhetsbaserat område, dvs. utifrån bussterminalens lokalisering. Dessutom studeras olycksrisker i omgivningen som kan påverka planområdet respektive olycksrisker i planområdet som kan nå utanför detaljplanens gränser. Detta förklaras mer ingående i avsnitt 2.3.1. Referensåret för påverkansområdet runt Slussen är valt till 2050.

Vidare presenteras i denna riskbedömning främst riskreducerande åtgärder som bedömts påverka markanvändning eller funktion. Riskbedömningens fokus är att hantera risker som kan regleras i detaljplanen, inte att hantera risker som uppkommer hos respektive verksamhetsutövers dagliga drift; detta förutsätts hanteras inom ramen för där tillämplig lagstiftning.

1.4 Styrande dokument

Riskbedömningen upprättas som ett underlag för beslut om den planerad markanvändningens lämplighet. Det finns flera styrande dokument, som berör riskhantering, som skall beaktas vid nyexploatering.

1.4.1 Plan- och bygglagen

Plan- och Bygglagen (2010:900) anger följande:

Vid planläggning och i ärenden om bygglov eller förhandsbesked enligt denna lag får mark tas i anspråk för att bebyggas endast om marken från allmän synpunkt är lämplig för ändamålet. (2 kap. 4§)

Vid planläggning och i ärenden om bygglov eller förhandsbesked enligt denna lag ska bebyggelse och byggnadsverk lokaliseras till mark som är lämpad för ändamålet med hänsyn till människors hälsa och säkerhet samt risken för olyckor, översvämning och erosion.

Vid planläggning och i ärenden om bygglov enligt denna lag ska bebyggelse och byggnadsverk utformas och placeras på den avsedda marken på ett sätt som är lämpligt med hänsyn till skydd mot uppkomst och spridning av brand och mot trafikolyckor och andra olyckshändelser, ... (2 kap. 6§).

I plan- och bygglagen ställs även krav på att en detaljplan skall miljöbedömas om planen antas medföra betydande miljöpåverkan, vilket är fallet för den aktuella planen. Dessutom ställs krav på att en MKB tas fram för den verksamhet som ska prövas vid antagandet av planen.

1.4.2 Miljöbalken

I Miljöbalken, (SFS 1998:808), ställs krav på att människors hälsa ska skyddas. Kraven definierar en hållbar utveckling där nuvarande och kommande generationer tillförsäkras en hälsosam och god miljö. Detta innebär bland annat att människors hälsa och miljö ska skyddas mot skador och olägenheter som förorsakas av föroreningar eller annan påverkan. Det är primärt i miljöbalken som innehållet i MKB:n regleras.

1.4.3 Rekommendationer och riktlinjer

Lagstiftningen anger när en riskanalys bör göras men inte i detalj hur en sådan ska utföras eller vad den ska innehålla. För att tydliggöra detta har Länsstyrelsen i Stockholms län har gett ut rekommendationer som stöd i arbetet med att ta hänsyn till risker i planprocessen; Riktlinjer för riskanalyser som beslutsunderlag (6). Dessa dokument utgör generella rekommendationer beträffande vilka krav som bör ställas på riskanalyser i bl.a. planärenden. De skyddsavstånd och hänsynsregler som finns i dessa rekommendationer har beaktats vid genomförandet av denna riskbedömning.

1.4.4 Övriga styrande dokument

Ytterligare ett antal lagar, förordningar och föreskrifter avseende risk och säkerhet kan vara relevanta i planärenden, även om det i dessa ej explicit definieras att riskanalyser ska genomföras i detaljplaneprocessen. Dessa berör i första hand hantering och rutiner för olika typer av riskkällor som kan vara värda att beakta. Exempelvis har Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) gett ut föreskrifter för hantering av brandfarliga och explosiva varor. För byggnaders och anläggningars uppförande finns Boverkets Byggregler (BBR), Boverkets konstruktionsregler (EKS), Eurokod och Trafikverkets krav och råd för tunnlar (Tunnel 11).

1.5 Underlag

Inom ramen för arbetet med riskbedömningen har ett stort antal utredningar, underlagsrapporter och ritningar, som upprättats inom ramen för framtagande av systemhandling för Slussens bussterminal studerats, bland annat ett säkerhetskoncept (7) och riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal, se Appendix A. Dessutom har planunderlag från intilliggande lagakraftvunna detaljplan Slussen utgjort underlag (8) (9), samt aspekter som påtalats vid framtagande av behovsbedömning (10) och rekommendationer som lämnats vid en särskild genomlysning av projektet (11). Utöver detta har domar från Mark- och miljödomstolen (5) respektive Mark- och miljööverdomstolen (4) beaktats. För närmare beskrivning av lokalisering av temporär bussterminal har tidigare utredningar studerats. (12)

Systemhandlingen togs fram till en detaljplan som upphävdes 2013-12-06 innan den vunnit laga kraft. Den anläggning och det planförslag som utreds i denna riskbedömning baseras på den tidigare systemhandlingen, men utgörs delvis av en annan tekniska utformning. Sedan förra detaljplanen har konceptet utvecklats, bl a utifrån synpunkter och rekommendationer som inhämtats. Exempel på frågor som arbetats vidare med är att precisera ett säkerhetsmål som del av bedömningsgrunden, konsekvenser av att trafikera anläggningen med dubbeldäckare samt hantering av släckvatten.

1.6 Kvalitetssäkring

Rapporten är utförd av Jenny Axelsson (Brandingenjör/ Civilingenjör Riskhantering) och Maria Persson (Kemiingenjör) med Johan Lundin (Brandingenjör/Tekn. Dr) som uppdragsansvarig. I enlighet med WSP:s miljö- och kvalitetsledningssystem, certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001, omfattas denna handling av krav på internkontroll. Detta innebär bland annat att en från projektet fristående person granskar förutsättningar och resultat i rapporten. Ansvarig för denna granskning har varit Björn Yndemark (Brandingenjör).

2 Omfattning av riskhantering och metod

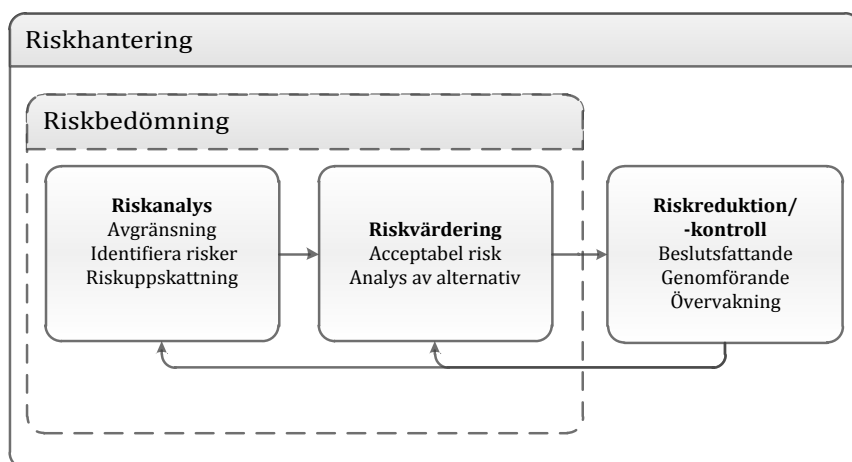
Detta kapitel innehåller en beskrivning av begrepp och definitioner, arbetsgång och omfattning av riskhantering i projektet samt de metoder som använts.

2.1 Begrepp och definitioner

Begreppet risk avser kombinationen av sannolikheten för en händelse och dess konsekvenser. Sannolikheten anger hur troligt det är att en viss händelse kommer att inträffa och kan beräknas om frekvensen, d.v.s. hur ofta något inträffar under en viss tidsperiod, är känd.

Riskanalys omfattar, i enlighet med de internationella standarder som beaktar riskanalyser i tekniska system (13) (14), riskidentifiering och riskuppskattning, se Figur 1. Riskidentifieringen är en inventering av händelseförlopp (scenarier) som kan medföra oönskade konsekvenser, medan riskuppskattningen omfattar en kvalitativ eller kvantitativ uppskattning av sannolikhet och konsekvens för respektive scenario.

Sannolikhet och frekvens används ofta synonymt, trots att det finns en skillnad mellan begreppen. Frekvensen uttrycker hur ofta något inträffar under en viss tidsperiod, t.ex. antalet bränder per år, och kan därigenom anta värden som är både större och mindre än 1. Sannolikheten anger istället hur troligt det är att en viss händelse kommer att inträffa och anges som ett värde mellan 0 och 1. Kopplingen mellan frekvens och sannolikhet utgörs av att den senare kan beräknas om den första är känd.



Figur 1. Riskhanteringsprocessen.

Efter att riskerna analyserats görs en riskvärdering för att avgöra om riskerna kan accepteras eller ej. Som en del av riskvärderingen kan det även ingå förslag till riskreducerande åtgärder och verifiering av olika alternativ. Det sista steget i en systematisk hantering av riskerna kallas riskreduktion/-kontroll. I det skedet fattas beslut mot bakgrund av den värdering som har gjorts av vilka riskreducerande åtgärder som ska vidtas.

Riskhantering avser hela den process som innehåller analys, värdering och reduktion/-kontroll, medan riskbedömning enbart avser analys och värdering av riskerna.

2.2 Riskanalysmetoder

Denna riskbedömning har upprättats med både kvalitativ och kvantitativ metod och båda presenteras nedan.

2.2.1 Kvalitativ metod

I kvalitativa metoder används beskrivningar av typen stor, mellan eller liten, utan försök att närmre precisera sannolikheter för olika utfall eftersom det primära syftet med klassificeringen är att jämföra riskerna med varandra (15). I denna riskbedömning har antagonistiska hot och olyckor ovan mark utanför bussterminalen, t.ex. olyckor på Stadsgårdsleden och höga höjder och suicidrisker, beskrivits, uppskattats och värderas kvalitativt.

2.2.2 Kvantitativ metod

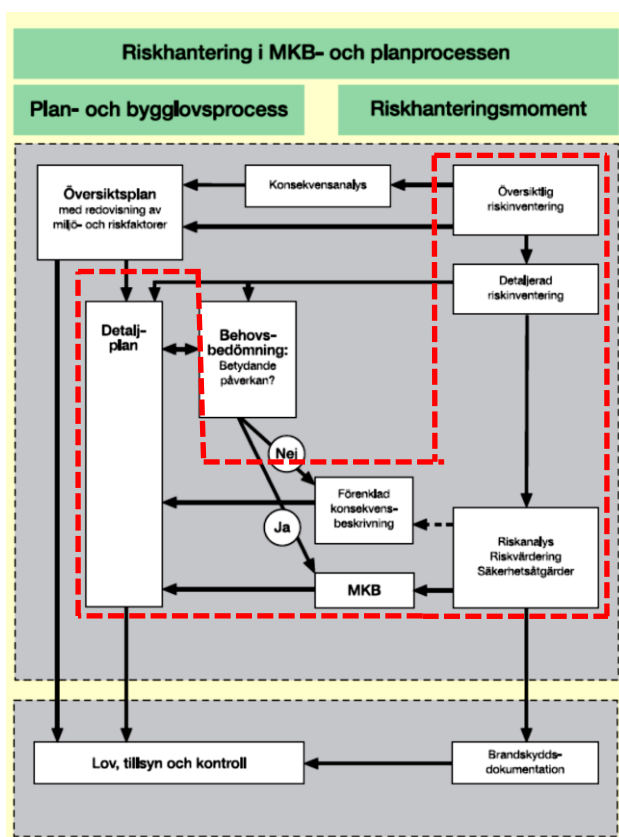
Kvantitativa metoder är helt numeriska och beskriver således risker med kvantitativa termer, exempelvis förväntat antal omkomna per år (16). För risker förknippade med hantering av fordonsgas i bussterminalen har beräkningar utförts för att visa den uppkomna risknivån.

2.3 Riskhantering i MKB- och planprocessen

Plan- och bygglagen (PBL) och Miljöbalken (MB) föreskriver att risker för människors hälsa och säkerhet ska beaktas i den fysiska planeringen och detaljplanearbetet. I det aktuella fallet sker både prövningen av verksamheten och markanvändningen med utgångspunkt från kraven i plan- och bygglagen.

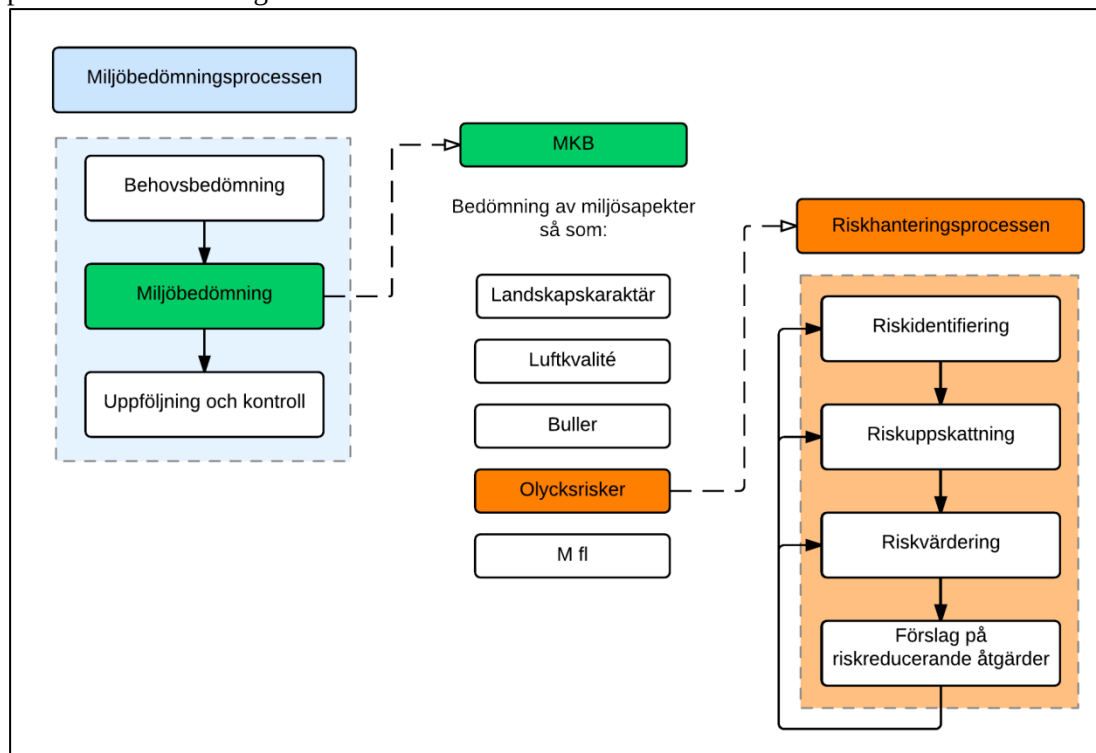
Lagstiftningen innebär att riskhantering behöver integreras i detaljplanearbetet och att ställningstaganden görs rörande risknivå kopplat till den tänkta markanvändningen.

Hur riskhanteringsprocessen bör se ut i fysisk planering presenteras schematiskt i Figur 2. De röda streckade linjen anger omfattningen i denna riskbedömning.



Figur 2. Riskhantering i MKB- och planprocessen.

Utifrån ovan presenterade metodik och process för riskhantering, presenteras nedan nyttjad metod för denna riskbedömning, se Figur 3. Figuren illustrerar hur riskpåverkan utgör en parameter som kan innebära betydande miljöpåverkan tillsammans med flera andra. I figuren visas hur dessa begrepp och processer förhåller sig till varandra.



Figur 3. Schematisk illustration av hur riskhanteringsarbetet integreras i den övergripande miljöbedömningsprocessen.

2.3.1 Riskinventering och riskidentifiering

För att ta reda på vilka olyckshändelser och riskkällor som kan vara relevanta för planområdet har omgivningen studerats, inom ramen för riskbedömningens avgränsningar, utifrån olika perspektiv. De olika perspektiven beskrivs nedan och illustreras även i Figur 4.

- Olycksrisker i omgivningen som kan påverka människor inom ett plan- eller verksamhetsområde.
- Olycksrisker som finns inom ett plan- eller verksamhetsområde och påverkar människor inom området.
- Olycksrisker som finns inom ett planområde eller inom en verksamhet eller ett verksamhetsområde och som kan påverka omgivningen.

Utgångspunkten för inventering, analys och bedömning är den förändrade risknivå som kan förväntas med hänsyn till den föreslagna detaljplanen. Utgångspunkten är således en jämförelse mellan huvudalternativet, nuläget och nollalternativet i MKB. Geografiska och tidsmässiga avgränsningar samt miljöaspekter presenteras mer i detalj i detaljplanens MKB.

Perspektiv A

Riskkälla = olycka som sker i angränsande närområde

Skyddsobjekt = personer som rör sig inom verksamhetsområdet

Perspektiv B

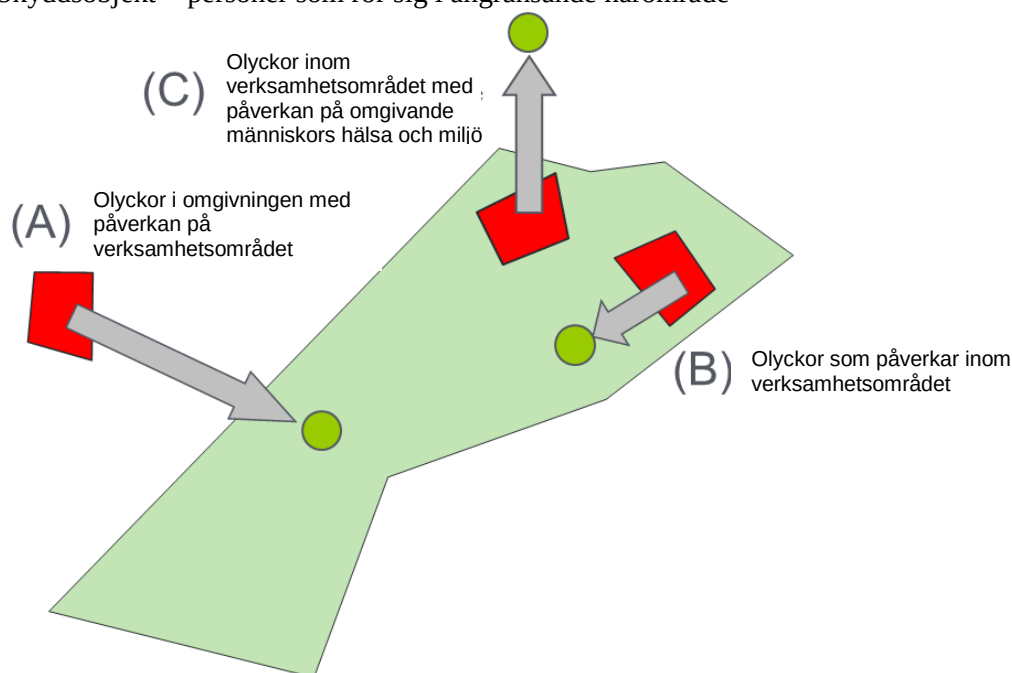
Riskkälla = olycka som sker inom verksamhetsområdet

Skyddsobjekt = personer som rör sig inom verksamhetsområdet

Perspektiv C

Riskkälla = olycka som sker inom verksamhetsområdet

Skyddsobjekt = personer som rör sig i angränsande närområde



Figur 4. Visualisering av de tre perspektiven som riskinventeringen utgått ifrån.

2.3.2 Fördjupade riskanalyser

De olyckshändelser och riskkällor som bedömts ge upphov till förändrad risknivå, analyseras mer ingående genom separata analyser. Händelsernas olycksfrekvenser och konsekvenser studeras via logiska argument och/eller via kvantitativa metoder för att värdera risknivån. Om risknivån bedöms som oacceptabel, enligt de använda acceptanskriterierna ges förslag på riskreducerande åtgärder för att nå en acceptabel risknivå.

2.4 Metod för riskuppskattning

I denna rapport uppskattas i huvudsak risker som bedöms ha potential att medföra betydande påverkan. Riskuppskattningen har skett både kvalitativt och kvantitativt eftersom behovet av riskanalys varierar.

För de risker som uppskattas kvalitativt har flera aspekter använts för att identifiera olycksscenarierna. Detta innebär bland annat användandet av en erfarenhetsbaserad kännedom om olyckors storleksordning, en uppfattning om etablerade tekniska lösningar eller ny teknik samt kännedom om olika kemiska ämnen. Risknivån uttrycks för de kvalitativa riskerna enligt Tabell 1.

Tabell 1. Förklaring av kvalitativa risknivåer.

Riskenivå	Innebörd
Obetydlig	Obefintlig eller liten i förhållande till kravnivåer och regler som finns uppsatta.
Påtaglig	Kräver hantering, men bedöms inte medföra oacceptabel riskpåverkan om den omhändertas. Medför potential för att en eller flera människor kan komma till skada.
Betydande	Stor riskpåverkan, behov av särskilda utredningar och riskreducerande åtgärder utöver normal/planerad utformning av anläggningen är nödvändig.

För vissa risker har statistik använts för att kontrollera den allmänna olycksnivån för risken. Parallellt med detta har lagstiftningens krav kontrollerats, bland annat Lagen om brandfarliga och explosiva varor samt Boverkets byggregler.

I de fördjupade delarna av denna riskbedömning har riskmåttan samhällsrisk och individrisk använts för att kvantitativt uppskatta risknivån med avseende på identifierade risker. För de fördjupade delarna är det nödvändigt att använda sig av båda riskmåttan, samhällsrisk och individrisk vid uppskattning av risknivån i ett område så att risknivån för antalet personer som samtidigt påverkas (samhällsperspektiv) tas i beaktande samtidigt som hänsyn tas till hur stora konsekvenserna kan bli med avseende på den enskilde individen (individperspektiv).

För uppskattning av risknivån har tidigare utförda kvantitativa analyser legat till grund. För beräkning av frekvenser/sannolikheter för respektive skadescenario används händelseträdsanalys. Konsekvenserna av olika skadescenarier uppskattas utifrån litteraturstudier, datorsimuleringar och handberäkningar.

2.4.1 Samhällsrisk

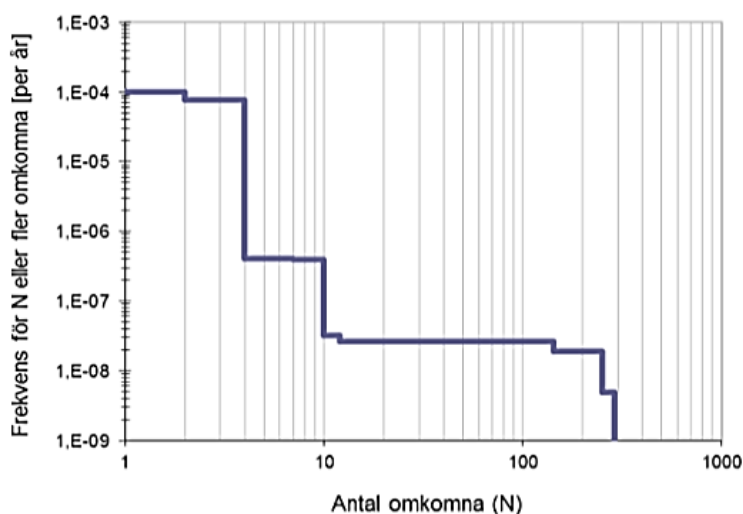
Riskmåttet samhällsrisk beaktar hur stora konsekvenserna kan bli med avseende på antalet personer som påverkas vid olika skadescenarier. Hänsyn kan därmed tas till befolkningssituationen inom det aktuella området, i form av befolkningens mängd och persontätthet. Hänsyn tas även till eventuella tidsvariationer, som t.ex. att persontättheten i området kan vara hög under en begränsad tid på dygnet eller året och låg under andra tider.

2.4.1.1 Riskprofil, F/N-kurva

Samhällsriskens redovisas ofta med en F/N-kurva (Frequency/Number), se Figur 5, som visar den ackumulerade frekvensen för N eller fler omkomna till följd av de antagna olycksscenarierna.

I F/N-kurvan illustreras hur ofta olyckor sker med ett givet antal omkomna personer, och det går således att särskilja på frekvensen av olyckor med en liten konsekvens och olyckor med stor konsekvens.

Eftersom axlarna i grafen är logaritmiska är det svårt att avgöra hur stor skillnaden mellan två (eller flera) givna kurvor är. Därför kan samhällsriskens även presenteras som ett förväntat antal omkomna per år. Detta tal kan ses som ett medelvärde av hur många som förväntas omkomma per år, och utgör ett mått på farligheten ur ett samhällsperspektiv.



Figur 5. Exempel på F/N-kurva för beskrivning av samhällsrisk.

2.4.1.2 Medelrisk

Medelrisk är ytterligare ett sätt att presentera samhällsrisk, men där variationen av konsekvensens storlek för olika scenarier inte framgår. Riskmålet utgörs av ett förväntat antal exponerade per år. Exponeringsnivån kan variera, vanligt är att förväntat antal döda per år används. Beräkning av medelrisk görs genom att riskbidraget från samtliga scenarier beräknas genom att frekvensen för scenariot multipliceras med dess konsekvens. De olika scenariernas bidrag summeras sedan och detta utgör den beräknade medelrisken. Vid framtagande av riskprofil används istället samtliga scenariers frekvens och konsekvens var för sig och dessa plottas in i ett så kallat F/N-diagram med logariterade värden på axlarna. Frekvenserna, F, kumuleras så att de motsvarar frekvensen för N eller fler exponerade.

2.4.2 Individrisk

Individrisken är sannolikheten att omkomma för en person som kontinuerligt vistas på en specifik plats, t.ex. på ett visst avstånd från en industri eller transportled, oftast utomhus (17). Individrisken är platsspecifik och är oberoende av hur många personer som vistas i det givna området. Syftet med riskmålet är att se till att enskilda individer inte utsätts för oacceptabla risknivåer.

I denna riskbedömning har dock individrisken betraktats som en aktivitetsspecifik risk snarare än en platsspecifik risk. För individrisk används därför ett aktivitetsbaserat riskmål, dvs. sannolikheten att omkomma per tillfälle som byte sker i bussterminalen. Att använda ett platsspecifikt riskmål bedöms inte vara lika relevant i ett sammanhang där ett flöde av människor är mer dominerande som princip än att personer vistas på en specifik plats varaktigt.

För att kunna beräkna individrisken har indata för sannolikheten för förväntat antal omkomna per år använts i kombination med hur många resor som förväntas göras i bussterminalen.

2.4.3 Kumulativ risk

Kumulativ riskpåverkan kan sägas vara uppbyggd av två delar: additiv riskpåverkan och synergistisk riskpåverkan. Additiv riskpåverkan innebär att flera risker adderas till varandra och om de exempelvis påverkar samma fysiska område. En synergistisk effekt innebär en förstärkt effekt och ur riskhänseende kan det till exempel innebära att två olyckor som inträffar till följd av varandra ger en större konsekvens än om respektive olycka hade inträffat var för sig. Dominoeffekt är ett exempel på en synergistisk riskpåverkan. (18)

Additiv riskpåverkan kan illustreras med följande exempel. Ett påverkansområde, t.ex. ett bostadshus, utsätts över tid av riskpåverkan från riskkälla A (t.ex. en industri), riskkälla B (t.ex. en farligt godsled), riskkälla C (t.ex. översvämning). Den kumulativa riskpåverkan avseende påverkansområdet är den totala påverkan från riskkälla A, B och C.

Ett exempel på synergistisk riskpåverkan är om riskkälla A (t.ex. ett jordskred) utlöser att riskkälla B (t.ex. en cistern) påverkar riskkälla C (t.ex. annan cistern). Det inledande skredet har då fått större konsekvenser än om riskkälla A inträffat där ingen påverkan skett på riskkällorna B och C.

2.5 Bedömningsgrund – metod för riskvärdering

I riskvärderingen görs en bedömning om risken är acceptabel, det vill säga att den befinner sig på en nivå som är acceptabel under beaktande av redan existerande säkerhetskrav. Om den inte är acceptabel, ska riskreducerande åtgärder eller säkerhetskrav för att minska riskerna identifieras och därefter görs en ny värdering. Detta bör fortgå tills risken är acceptabel för att en åtgärd eller ett projekt skall vara lämpligt att genomföra.

Det saknas miljökvalitetsnormer för att bedöma om riskpåverkan på människors liv och hälsa. Det finns inte heller nationella acceptanskriterier i föreskrifter eller allmänna råd från varken Boverket, Naturvårdsverket eller Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Bedömningsgrunden är därför förknippad med osäkerheter och är fragmentarisk genom att olika typer av risker bedöms på olika vis, både med avseende på hur mycket risk som är acceptabel men även med vilken metodik som värderingen görs.

Den väletablerade praxis som normalt används är att det finns olika sätt att göra bedömningen om en risk är acceptabel eller ej. I huvudsak bedöms riskerna typ för typ och en samlad bedömning av den totala riskpåverkan kan möjligen göras på kvalitativa grunder och med en stor portion uppskattning av ovan nämnda skäl. Detta medför även att det är svårt att göra en sammantagen jämförelse mellan olika alternativ. Det är betydligt enklare att jämföra alternativen utifrån respektive risktyp. De huvudsakliga principerna för att bedöma om en risk är acceptabel eller ej är:

- a) vedertagen praxis,
- b) uttrycklig riskuppskattning.

2.5.1 Vedertagen praxis

Med vedertagen praxis avses att praxisen är allmänt vedertagen för den aktuella risktypen, om den är relevant för att kontrollera riskkällorna och om den är offentligt vedertagen. Risker som kontrolleras enligt denna praxis är acceptabla och behöver inte analyseras vidare. Det identifierade säkerhetskravet blir ju att använda den vedertagna praxisen. Om en risk inte kan accepteras enligt denna princip, så är det ofta möjligt att välja att utföra en uttrycklig riskuppskattning förutsatt att det regelverk som detaljreglerar den aktuella risken öppnar upp för denna möjlighet. Det är ofta genom specifik lagstiftning som denna reglering görs, till exempel genom lagen om brandfarliga och explosiva varor eller arbetsmiljölagen. Exempel på vedertagen praxis är föreskrifter, allmänna råd och i viss mån handböcker och riktlinjer från myndigheter.

2.5.2 Uttrycklig riskuppskattning

Vid användandet av uttrycklig riskuppskattning uppskattas risker kvantitativt eller kvalitativt, och utvärderas från satta kriterier för riskacceptans. Dessa acceptanskriterier utgör då en delmängd av anläggningens säkerhetsmål. Exempel på principer för uttrycklig riskuppskattning är As Low As Reasonably Practicable (ALARP). Ett sådant kriterium är i regel uppbyggt med tre nivåer, där en övre gräns på maximalt tillåten risk definieras och på samma vis en undre gräns för acceptabel risk där inga

ytterligare åtgärder behöver vidtas. Däremellan finns ett området, ALARP, som innebär att risker kan accepteras om alla rimliga åtgärder är vidtagna. En risk är acceptabel då den uppfyller kriterierna. Om den inte är acceptabel, ska ytterligare säkerhetskrav identifieras tills risken uppfyller kriterierna. Nya typer av risker kan accepteras enligt denna princip, förutsatt att det finns analysmetoder och tillräcklig data samt acceptanskriterier formulerade. Denna princip är vanlig för nya typer av system eller för system där utformningen skiljer mycket från anläggning till anläggning och det inte bedöms vara rimligt att utforma detaljerade säkerhetsregler.

Både samhällsrisk och individrisk används vid kvantitativa uppskattningar av risknivån i ett område, så att risknivån, uppskattad mot de satta acceptanskriterierna, för den enskilde individen beaktas samtidigt som hänsyn tas till hur stora konsekvenserna kan bli med avseende på antalet personer som påverkas.

2.5.3 Acceptanskriterier

De övergripande styrdokument avseende säkerhet som nämnts tidigare inkluderar inte några konkreta förslag på riskacceptanskriterier för individ- eller samhällsrisk och innehåller alltså inte något stöd i tillämpningen av kvantitativa riskmått. Avsaknaden av riskacceptanskriterier medför även svårigheter med att värdera om risknivån är lämplig eller ej. Det är svårt att med stöd av riskanalysen som verktyg få en indikation på om ytterligare säkerhetshöjande åtgärder är nödvändiga. Detta faktum är något som Expertgruppen (11) samt Storstockholms brandförsvär (19) tidigare påtalat för projektet.

Trafikering av undermarksanläggningar med bussar som drivs med fordonsgas är en relativt ny företeelse både nationellt och internationellt. Ingen vedertagen praxis för tillämpliga riskacceptanskriterier har identifierats. I Sverige finns inget nationellt beslut om vilket allmänt tillvägagångssätt eller vilka kriterier som ska tillämpas vid riskvärdering inom planprocessen. Praxis vid riskvärderingen i vissa sammanhang är att använda Det Norske Veritas (DNV) förslag på riskkriterier gällande individ- och samhällsrisk. DNV:s kriterier används alltså ofta i planprocessen när en väg eller järnvägs riskpåverkan på ett planområde ska beskrivas. För detaljplanen för bussterminal i Katarinaberget bedöms dessa inte vara tillämpliga. I stället har utgångspunkten för riskvärderingen tagits i väl motiverade och förankrade projektspecifika kvantitativa acceptanskriterier (20) som utarbetats i samverkan mellan Stockholm stad och Trafikförvaltningen i Stockholms läns landsting. Dessa har även fastställts av Trafikförvaltningen (21), som är den framtida verksamhetsutövaren.

Kvalitativa bedömningar och resonemang kring risknivå, riskvärdering och eventuella riskreducerande åtgärder förs också för de risker som ej kvantifieras. Bedömningsgrunden för detaljplanen är komplex, eftersom den utgörs av verksamhet både under och ovan mark och flera olika typer av olycksrisker förekommer. Inom undermarksanläggningen finns olika typer av verksamheter; in- och utfartstunnel, bussköryta, vänthall och gångar. Vänthallen och tekniska utrymmen betraktas som byggnader medan bergrummet som inrymmer busskörytorna samt in- och utfartstunneln betraktas som annan anläggning. Både för byggnader och andra anläggningar ställer plan- och bygglagen långtgående krav på att byggnadsverken skall vara säkra att vistas i, både med avseende på brandsäkerhet, konstruktion och användning.

Ett säkerhetskoncept (7) beskriver hela bussterminalens brandskyddslösning. Vid uppförande av en byggnad, i detta fall vänthallen och tekniska utrymmen, är Boverkets Byggregler (22) tillämpliga och det upprättade säkerhetskonceptet säkerställer att de delar som betraktas som byggnader uppfyller lagstiftningens krav och därmed har ett fullgott brandskydd. Det behöver göras med s.k. analytisk dimensionering. För den analytiska dimensioneringen finns inga kvantifierade acceptanskriterier i form av riskmått, utan lagstiftningen uppfylls genom vedertagna modeller och simuleringar och genom att analytiskt studera och dimensionera den föreslagna byggnaden.

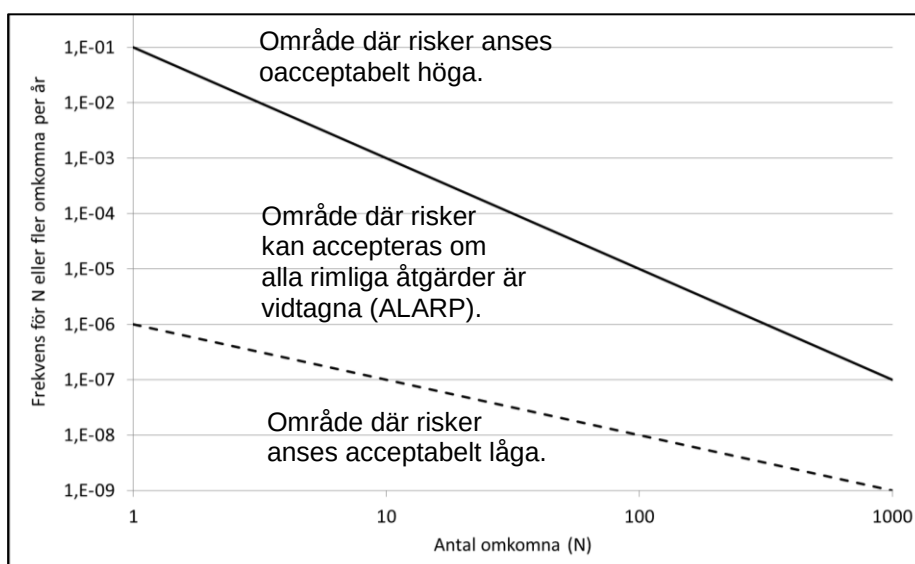
För de delar som betraktas som anläggning, dvs. busskörytan samt in- och utfartstunneln, är BBR inte direkt applicerbar, utan för dessa delar i brandskyddsbeskrivningen är Plan- och bygglagen styrande

med både de tekniska egenskapskraven för anläggningen och generella aktsamhetskrav för markanvändningen. I projekteringen har t.ex. Trafikverkets riktlinjer TRVK Tunnel använts som vägledning. För busskörytan samt in- och utfartstunneln saknas därmed både tydliga kvantifierbara acceptanskriterier eller detaljerade krav för att uppnå en acceptabel säkerhet, dvs. inga numeriska värden föreslås användas för att beskriva en acceptabel risknivå i vare sig PBL eller TRVK Tunnel. Detta har föranlett att ett förslag till säkerhetsmål har tagits fram för bussterminalen i Katarinaberget. Säkerhetsmålet (20) har kvantifierats genom riskacceptanskriterier för riskmåten individ- och samhällsrisk. Kvantifiering bygger på en jämförelse med riskacceptanskriterier för andra typer av anläggningar och verksamheter inom andra sektorer både nationellt och internationellt. En rimlighetskontroll har också utförts vilken visar på att säkerhetsmålets risknivå är lägre eller i samma storleksordning som för andra motsvarande risker i samhället, t.ex. i andra moderna trafikanläggningar. Motsvarande tillvägagångssätt har använts för att ta fram förslag till säkerhetsmål för trafiktunnlar för att kunna värdera risk. I en rapport från Transportstyrelsen redogörs ingående för detta tillvägagångssätt och för den riskanalytiska grund som detta vilar på i sin rapport "Säkerhetsmål för trafikanter i vägtunnlar, järnvägstunnlar och tunnelbana" (23).

2.5.3.1 Samhällsrisk

2.5.3.1.1 F/N-kurva

Det fastställda acceptanskriteriet består av en övre och en undre F/N-kurva, se Figur 6. Vid tillämpning av riskacceptanskriteriet i bussterminalen kan det vara nödvändigt med anpassning eller skalning. Exemplet från svensk vägtunnel avser en vägsträcka på cirka 800 meter och det har uppskattats att vid tät trafik så befinner sig ungefär 600-700 personer längs denna sträcka. I bussterminalen som i vissa avseenden kan ses som vägtunnelliknande är längden motsvarande 800 meter och cirka 1000 personer vistas på eller i nära anslutning till busskörytan. Denna bedömning förutsätter då att trafikytorna i bussterminalen är avskilda från resenärsytorna och att personer inne i vänthallen inte utsätts för risk. Under dessa förutsättningar bedöms därför bussterminalen i grova drag motsvara samma storlek på anläggning och motsvarande antal personer som nyttjar och exponeras för risk i anläggningen. Därför bedöms i detta skede inte någon ytterligare skalning eller anpassning av kriteriet vara nödvändigt.



Figur 6. Fastställt acceptanskriterium för bussterminalen i Katarinaberget.

2.5.3.1.2 Medelrisk

För bussterminalen i Katarinaberget föreslås som komplement till F/N-kurvan en maximal medelrisk på $3,3 \times 10^{-2}$ omkomna per år vilket ger motsvarande säkerhet som på det svenska vägnätet. Detta tillvägagångssätt motsvarar förslag till fastställande av acceptanskriterium i samband med godkännande av en modern svensk vägtunnel. En jämförelse kan göras med medelrisk för andra länder inom andra sektorer, för att underlätta tolkningen och värderingen av Figur 6.

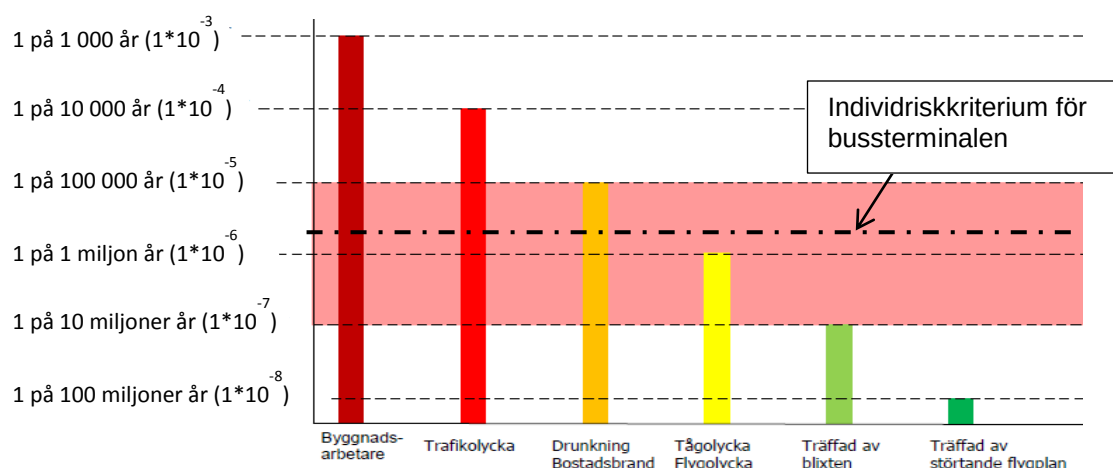
Tabell 2. Maximalt förväntat antal omkomna per år (medelrisk) enligt riskacceptanskriterium för olika länder inom olika sektorer.

Land och sektor	Förväntat antal omkomna per år (medelrisk)
UK Hamn, RORO (per fartyg)	$6,9 \cdot 10^{-1}$
Italienska tunnlar (per km)	$4,6 \cdot 10^{-1}$
Danska vägtunnlar (per km)	$4,0 \cdot 10^{-1}$
UK kemisk industri	$6,9 \cdot 10^{-2}$
Förslag svensk vägtunnel (per km)	$9,9 \cdot 10^{-2}$ resp $3,3 \cdot 10^{-2}$
Holländska vägtunnlar (per km)	$9,9 \cdot 10^{-3}$
Holländsk kemisk industri	$9,9 \cdot 10^{-4}$
Sverige exploatering FG-led övre (per km)	$6,9 \cdot 10^{-4}$
Sverige exploatering FG-led lägre (per km)	$6,9 \cdot 10^{-6}$

2.5.3.2 Individrisk

Individriskkriterium för bussterminalen i Katarinaberget ingår i säkerhetsmålet; $2,2 \times 10^{-6}$. Denna siffra är beräknad utifrån uppgifter om riskacceptanskriteriet i samband med godkännande en modern svensk vägtunnel, där maximal sannolikhet att omkomma till följd av arbetspendling i modern trafik-tunnel längs motortrafikled i storstadsmiljö utreddes (20).

För att underlätta att få en uppfattning om denna risknivås storlek kan jämförelse göras med andra risker som kan orsaka dödsfall i samhället, se Figur 7, där den angivna nivån framgår med punktstreckad linje.



Figur 7. Individrisk för dödsfall till följd av olika händelser eller aktiviteter. Skrafferad yta motsvarar exempel på område som bedöms utgöra s k ALARP-nivå för ökning av individrisk till följd av mänsklig aktivitet såsom industriverksamhet.

2.6 Metod för identifiering av riskreducerande åtgärder

Om risknivån bedöms som ej acceptabel kommer riskreducerande åtgärder identifieras och föreslås. Exempel på vanligt förekommande riskreducerande åtgärder anges i Boverkets och Räddningsverkets (nuvarande Myndigheten för samhällsskydd och beredskap) rapport Säkerhetshöjande åtgärder i detaljplaner (24), vilken är lämplig att använda som utgångspunkt. Åtgärder redovisas som kan eliminera eller begränsa effekterna av de identifierade scenarier, se säkerhetskonceptet (7), som bedöms ge störst bidrag till risknivån utifrån de lokala förutsättningarna. Riskbilden efter de valda åtgärdernas genomförande bör verifieras. Sådan verifiering sker inte fullt ut inom ramen för denna riskbedömning, men är lämplig att genomföra när detaljer gällande utformning är fastställda. Vissa övergripande verifieringar har redan skett i samband med systemhandlingsprojektering av bussterminalen i Katarinaberget, exempelvis inom brandsäkerhetsområdet, för att uppfylla lagstiftningens krav. Dessa verifieringar kommer att förfinas ytterligare under detaljprojekteringen.

I systemhandlingen presenterades ett antal tekniska lösningar för att hindra brands uppkomst samt åtgärder för att minimera konsekvenserna av en brand eller explosion.

3 Nuläget

Slussen är i dagsläget ett trafiknav där fotgängare, cyklister, vägtrafik och spårbunden trafik möts och Gamla stan och Södermalm länkas samman. Dagligen passerar stora mängder människor området. Merparten utgörs av resenärer, via kollektivtrafik, bil, tåg, cykel eller gående. I genomsnitt passerar cirka 300 000 människor Slussen som kollektivtrafikresenärer varje dag. Pendeltåg, regionala, och nationella tåg trafikerar Södra stambanan längs med Centralbron och tunnelbanan går på en egen bro väster om Slussens trafikanläggning. Saltsjöbanan har sin slutstation i den östra delen av Slussenområdet.

Slussenområdet är även stor knutpunkt för båttrafik. Det är ett stort antal båtar i reguljär- respektive fritidstrafik som passerar genom slussportarna, framför allt under sommarhalvåret. Nedströms Slussen i Saltsjön ligger båtar i reguljärtrafik med anlop och avgångar efter tidtabell. Sedan 1940-talet är Slussen en av de platser där Mälarens vattenstånd regleras. Bild över dagens Slussen kan ses i Figur 8.



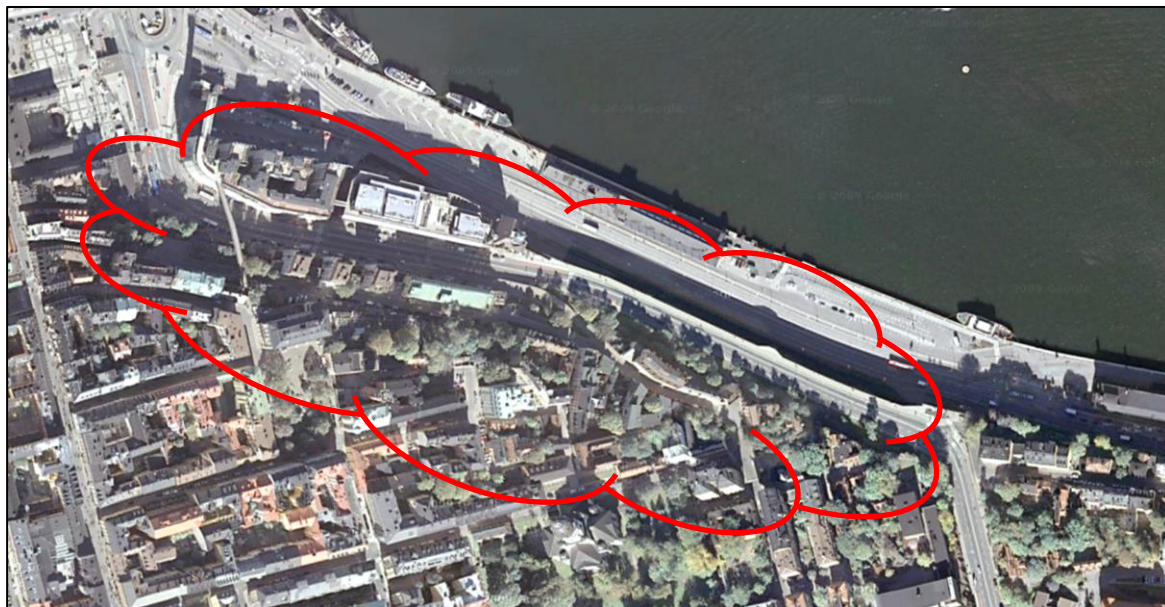
Figur 8. Översiktsbild av dagens Slussen och Stadsgårdsleden.

Dagens bussterminal ligger i anslutning till Slussens tunnelbanestation och Saltsjöbanan. Den norra delen av bussterminalen utgörs av en bussgata intill Stadsgårdsleden. Terminalen består i övrigt av tre bussfiler med mellanliggande påstigningsrefuger. Denna bussterminal ska vid huvudalternativets genomförande tas ur bruk.

Det område som ligger i direkt anslutning till huvudingången till den planerade bussterminalen domineras av kontor och handel. Utöver detta utgörs stora delar av angränsande området ovan mark av bostäder. Vid Katarinagaragets infart finns drivmedelsstation OK/Q8, men beslut om avveckling är taget och håller på att genomföras. Alla cisterner och mätarskåp för drivmedel är placerade i Katarinaberget och är förlagda under mark. Utanför själva stationsområdet, längs Katarinavägen, finns en uppsamlingsränna för att fånga upp eventuella läckage av drivmedel.

4 Huvudalternativet (planförslaget)

Planen syftar till att möjliggöra en bussterminal vid Slussen för kommunikationer mellan Nacka och Värmdö kommun och kollektivtrafiknoden Slussen. Huvudalternativet ska möjliggöra för byggnation av en bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i ett nytt bergrum under Katarinavägen och Mosebacke samt tillhörande ytor och funktioner. Detta i form av resenärsutrymmen och entréer, infart till terminalen från Stadsgårdsleden samt tekniska utrymmen under och ovan mark.



Figur 9. Ungefärlig lokalisering av planområdet. Inom det rödmarkerade området förväntas de slutliga plangränserna fastställas.

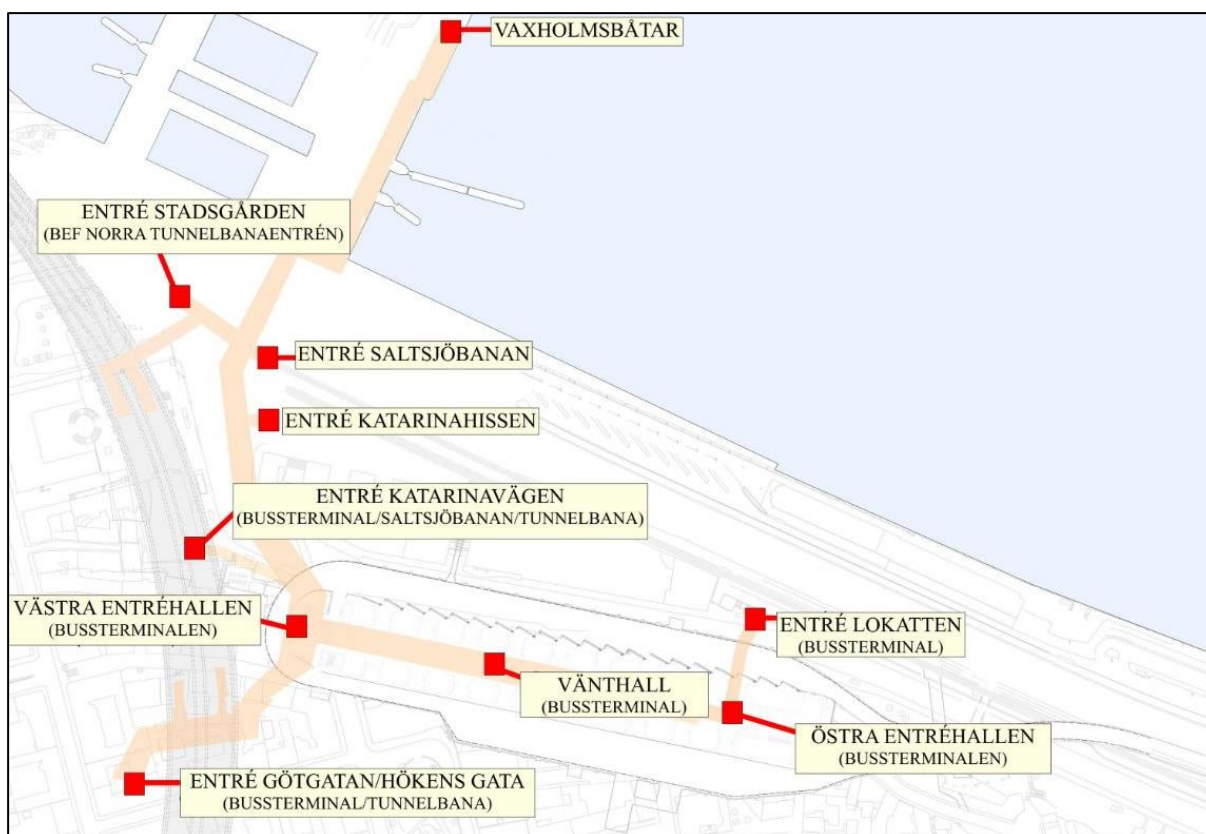
4.1 Översiktlig beskrivning av bussterminalen

Huvudentrén, i projekteringen kallad Entré Katarinavägen, till bussterminalen kommer vara lokaliserad där dagens poliskontor på Katarinavägen befinner sig. En ny entré, Entré Lokatten, kommer att byggas vid Stadsgårdskajen invid Lokattens trappor. Lokattens trappor kommer att rustas upp för gående mellan kajplanet och Katarinavägen. En hiss kommer också att installeras för ökad tillgänglighet. Bussterminalen kommer även ha en entré från befintlig tunnelbanestation Slussen. Utöver detta kommer ett antal utrymningsvägar från bussterminalen möjliggöra utgång på fler platser än via de tre huvudsakliga entréerna.

I dagsläget angränsar den planerade huvudentrén till drivmedelstation OK/Q8, som befinner sig på Katarinavägen inne i Katarinaberget. Stationen delar infart och utfart med Katarinagaraget. Runtom stationen finns både kontor, bostäder, hotell och några restauranger. Drivmedelstationen kommer att avvecklas oberoende av planprocessen.

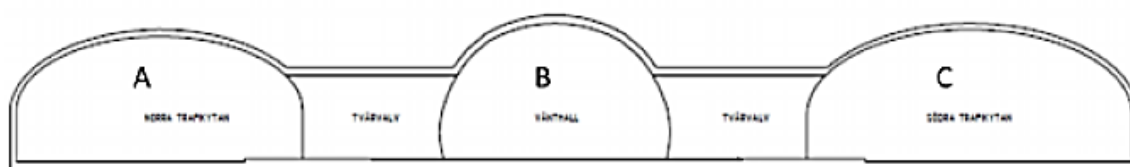
Infarten till bussterminalen från Stadsgårdsleden sker via tråg och en ny bergtunnel, med mynning i höjd med Birkaterminalen. Terminalens golv kommer ligga på nivån cirka -5 meter och ligga rakt under Katarinavägen, söder om KF- respektive Glashusen.

Bussterminalen kommer förbindas via kommunikationsstråk till tunnelbana och ytor för handel. I Figur 10 visualiseras huvudalternativets layout.



Figur 10. Huvudalternativets utformning där planerad bussterminal ansluter till tunnelbanan, Stadsgårdsleden och övrig omgivning.

Bussterminalen, se Figur 11, kommer vara ca 280 meter lång, 80 meter bred och bestå av tre valv, där två valv utgör bussköryta och ett valv utgör vänthallen.

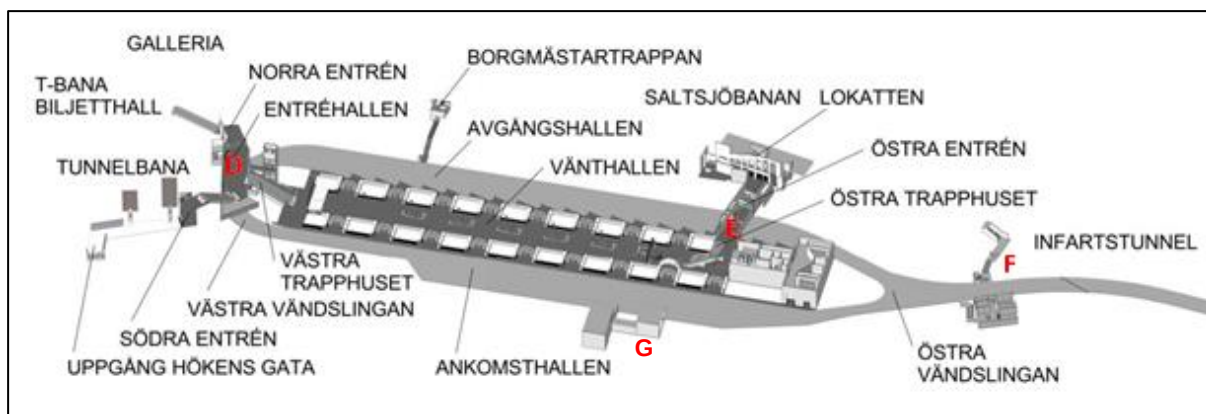


Figur 11. Principiell sektionsvy för bussterminalen, där A: Norra busskörytan B: Vänthall C: Södra busskörytan.

Vänthallen är ca 3700 m² stor. Pilhöjden i valvet är ca 8,6 m. Vänthallen utgör egen brandcell, brandtekniskt avskild från angränsande utrymmen. Avskiljningen är dessutom explosionsskyddad.

Antalet personer som samtidigt befinner sig i anläggningen bedöms vara ca 3000 under maxtimmen vid normal drift. I händelse av omfattande driftstörning, t. ex. vid kraftigt snöfall med trafikkaos som följd, kan bussrörelserna komma att stoppas helt. Vid ett sådant tillfälle förväntas maximalt 5000 personer vistas i anläggningen. Brandskyddet och övriga säkerhetssystem dimensioneras för att klara av den högre personbelastningen.

In- och utfartstunneln, se Figur 12, består av två filer, en uppåtgående och en nedåtgående, som avdelas av en låg refug med fasade kanter; denna remsa utgör också utrymningsfält. Utrymning från in- och utfartstunneln kan ske genom att följa detta 1,5 meter breda utrymningsfält eller genom att utrymma genom utrymningsvägen lokaliserad i norra bergväggen halvvägs upp i in- och utfartstunneln, markerad med F i Figur 12.



Figur 12. Planvy över bussterminalen, där D: Västra uppgången mot handel och befintlig tunnelbanestation E: Östra uppgången med mynning vid Entré Lokatten F: In- och utfartstunnel med utrymningsväg G: Pausutrymme för busschaufförer i anslutning till regleringsplatser.

4.2 Projekterade säkerhets- och skyddsåtgärder

Vid framtagande av systemhandlingen för bussterminalen har ett stort antal säkerhets- och skyddsåtgärder projekterats. Dessa presenteras översiktligt i följande avsnitt och beskrivs mer detaljerat i ett säkerhetskoncept (7).

Brandskyddet har i huvudsak projekterats med analytisk dimensionering enligt Boverkets byggregler (22). Huvudinriktningen i de allmänna råden om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd är att ge rekommendationer för en riskanalysmetod som benämns scenarioanalys. Anledningen till detta är att det är den vanligast förekommande metoden, som även har en lång tradition inom brandskyddsprojektering. Nackdelen är att vissa osäkerheterna inte hanteras explicit men enkelheten gör den användbar och resultaten enkla att kommunicera och verifiera (25). Med scenarioanalys avses en form av riskanalys där byggnaden testas mot ett antal fördefinierade scenarier som ska vara förhållandevis allvarliga. Om byggnaden klarar dessa bedöms säkerheten vara tillfredsställande. Detta innebär att osäkerheten i konsekvensen hanteras genom att välja dimensioneringssituationer som representerar en stor del av de teoretiskt möjliga utfallen. (26).

En kort summering av de allmänna råden för analytisk dimensionering innebär att verifiering med scenarioanalys bör utgå från att anläggningens brandskydd utsätts för ett eller flera scenarier. Val av scenarierna bör utgå från riskidentifieringen med hänsyn till att förutsättningarna och själva påfrestningen i sig kan variera. Erfordrade brandscenarier bör identifieras och motiveras så att de utgör en trolig värsta påfrestning. För samtliga dimensionerande scenarier bör exponeringen vara godtagbar. Verifiering med scenarioanalys kan baseras på de metoder och med de nivåer för godtagbar exponering. Verifiering med scenarioanalys bör omfatta en känslighetsanalys för att identifiera variabler som har stor påverkan på säkerhetsnivån. Sådana variabler bör behandlas konservativt. Exempel på variabler som kan ingå i känslighetsanalysen är brandeffekt, flamtemperatur, utrymnande personers gånghastighet och personers fördelning mellan olika utrymningsvägar. De variabler för vilka det ges värden i de allmänna råden behöver normalt inte analyseras med avseende på känsligheten. Resultatet av känslighetsanalysen bör ingå i en bedömning för att avgöra om den föreslagna brandskyddslösningen är tillfredsställande.

Scenarierna kan behöva upprepas för olika placeringar av branden om byggnaden är komplex och det inte går att förutsäga vilket som är den mest ogynnsamma placeringen av branden. De scenarier som bör ingå i analysen är tänkta att representera rimligt troliga värsta fall, detta avspeglas exempelvis genom att indata är mer konservativ för de fall då samtliga system fungerar som avsett. Scenarioanalysen behöver även inkludera felfungerande system. Dessa scenarier kännetecknas av ett brandförlopp som kan ses som en mindre påfrestning på byggnadens brandskydd men som utvecklas samtidigt som en-

skilda tekniska system inte fungerar som avsett. De tekniska system, som var och en för sig bör göras otillgängliga, är följande:

- Automatiskt brand- och utrymningslarm.
- Automatiskt släcksystem.
- Automatisk brandgasventilation eller annat system för begränsning av brand- och brandgasspridning.
- Hissar som används för utrymning.
- Följdfel bör beaktas om felet innebär att flera system kan slås ut av en händelse, t.ex. om strömförsörjning faller eller om styrsignaler uteblir.

Som komplement till scenarioanalysen används en kvantitativ riskanalys för att specifikt studera riskerna till följd av trafikering med fordonsgas. Även denna metod finns angiven som föreslagen verifieringsmetod i Boverkets byggregler.

4.2.1 Utrymning

4.2.1.1 Utrymningsstrategi

Utrymningsstrategin i bussterminalen bygger på:

1. att brand- och gasutsläpp ska upptäckas i ett tidigt skede av automatiskt brand- och/eller gasdetektionssystem, och
2. att de som vistas i bussterminalen ska uppmärksammas att de ska utrymma och få vägledning vart de ska utrymma.

Utrymningslarmanläggningens samordning med andra informationssystem, som trafikinformation, i bussterminalen, i handelsanläggningen och i Slussens tunnelbana är mycket viktig för att resenärer och andra som vistas i anläggningarna ska uppmärksammas att de ska utrymma och få vägledning vart de ska utrymma. Även styrning av signalreglering för ankommande bussar på Stadsgårdsleden är väsentlig för att förhindra att ytterligare bussar kör in i anläggningen om brand uppstår. Ytterligare åtgärder behöver vidtas av ledningsfunktion för att hantera utrymningsfrågan; t.ex. att trafikinformation som ger information om bussavgångar inte används samtidigt som utrymningslarm uppmanar resenärer att utrymma, eftersom detta kan skapa förvirring och avsevärt fördröja utrymningen.

Då bussterminalen utgör en undermarksanläggning och hög personbelastning förväntas är behovet av utrymningsvägar stort. Genom utrymningsanalyser (bl.a. med simuleringsprogrammet STEPS (27)) har flera utrymningskoncept analyserats utifrån olika dimensionerande personantal och brandplacering. Genom följande utrymningsvägar har utrymningsmöjligheterna i anläggningen säkerställts:

- Entré Lokatten.
- In- och utfartstunneln till bussterminalen.
- Utrymningsväg från in- och utfartstunneln till Stadsgårdsleden
- Borgmästartrappan.
- Katarinagaraget.
- Entré Katarinavägen.
- Utrymningsportar vid Thor Modéens trappor.

Utrymningsvägen Entré Lokatten kommer mynna på trottoar invid Stadsgårdsleden. En gångtunnel under Saltsjöbanan kommer byggas, för att undvika att utrymmande människor ska korsa spåren. Möjlighet finns även att via trappa i anslutning till gångtunneln nå Saltsjöbanans perrong och vidare mot Lokattens trappor. Denna utrymningsväg kan även utgöra en framtida entré till bussterminalen österifrån, något som skulle kunna få påverkan på bussterminalens informationssystem i driftskedet, se avsnitt 4.2.1.

Utrymning ut ur in- och utfartstunneln sker i huvudsak på ett upphöjt utrymningsfält lokaliserat mellan körfälten. In- och utfartstunneln har dessutom nödbelysning samt en egen utrymningsväg lokaliserad i mitten av tunneln som mynnar på trottoar vid Stadsgårdsleden, mellan befintliga Lokattens trappor och Birkaterminalen i öster. Vidare förflyttning från platsen där denna utrymningsväg mynnar sker via trottoar bort mot Entré Lokatten.

4.2.1.2 Utrymningstider

Vid dimensionering av utrymningssäkerheten för denna typ av anläggning ställs inga explicita krav på maximal utrymningstid för att utrymma hela byggnaden i Boverkets byggregler (22). Kraven i regelverket tar i stället utgångspunkt i att personer inte skall behöva köa för att nå utrymningsväg mer än en viss tid (maximalt 8 minuter) vilket uppnås med god marginal i bussterminalen. Vidare anger kraven att det från alla lokaler skall finnas tid att utrymma innan kritiska (jmf skadliga) förhållanden uppstår vid brand. Det innebär att eventuell väntan på att utrymma inte får ske i rökfylld miljö. Dessutom skall det finnas tillgång till oberoende utrymningsvägar. I samband med brandteknisk dimensionering av anläggningen utreds i detalj att dessa krav uppfylls för ett flertal olika scenarier, t.ex. olika brandplace-ringar, olika brandstorlekar, om olika tekniska system felfungerar, om olika utrymningsvägar är blockerade, för olika personbelastningar m.m. Denna dimensionering genomförs först övergripande i programskedet och förfinas sedan successivt med ökande detaljeringsgrad i system- respektive bygghandling. I samband med detta utvecklas och optimeras detaljerna kring säkerhetskonceptet, varför vissa justeringar av konceptet är naturliga när detaljutformning och ökad kunskap om hur anläggningen är tänkt att användas preciseras ytterligare.

4.2.2 Bärverkets förmåga att stå emot brand

Med hänsyn till föreslagna konstruktionstekniska lösningar ska brandskydd för bärande konstruktioner i bussterminalen dimensioneras mot den s.k. Hydro Carbon-kurvan, HC-kurvan, under minst 90 minuter. HC-kurvan är en modell för att visa en brands temperaturutveckling som funktion av tiden. HC-kurvan används ofta i dimensionering av tunnlar, eftersom den visar på ett snabbare brandförlopp än vad andra standardiserade brandkurvor gör.

4.2.3 Utveckling och spridning av brand och brandgaser begränsas

Via brandgassimuleringar med fältmodellen FDS (28) har ett koncept för brandgasventilation definierats som möjliggör effektiv evakuering av brandgaser (brandrök) från busskörytan, infarts/utfartstunneln samt vänthallen. Resultaten visar att det krävs stor kapacitet på den mekaniska till- och frånluften för att säkerställa säker utrymning och räddningstjänstens insatsmöjlighet.

Konceptet för brandgasventilationen är något olika för busskörytan och för in- och utfartstunneln. Då en brand detekteras i busskörytan sugas brandgaserna ut genom samma system och utsläppspunkt som nyttjas för allmänventilationen. Utsläppspunkten för brandgaserna befinner sig öster om Entré Lokatten. Tilluften tas då via in- och utfartstunneln. Vid brand i in- och utfartstunneln kommer däremot allmänventilationens fläktar att reverseras och utgöra tilluftsfläktar. Brandgaserna kommer då att tryckas ut till det fria via in- och utfartstunneln.

Vänthallen är utformad som egen brandcell. Utöver detta är den även utformad att klara en explosion med fordonsgas från busskörytan. Vänthallen är övertrycksatt i förhållande till busskörytan så att brandgaser inte kan läcka in i vänthallen, t.ex. i samband med att en eller flera dörrar är öppna när personer förflyttar sig mellan busskörytan och vänthallen. Riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal, se Appendix A, har utrett olika scenarier med fordonsgasexplosioner och utifrån detta har det föreslagits att den avskiljande konstruktionen in till vänthallen samt bärverket i bussterminalen ska klara en tryckuppslag med 10 kPa. Dimensionerande explosionslast för bärverk i bussterminalen är dock baserat på antagonistiska hot och inte explosion med fordonsgas eftersom den sistnämnda ger lägre tryckpåverkan.

4.2.4 Insatskoncept

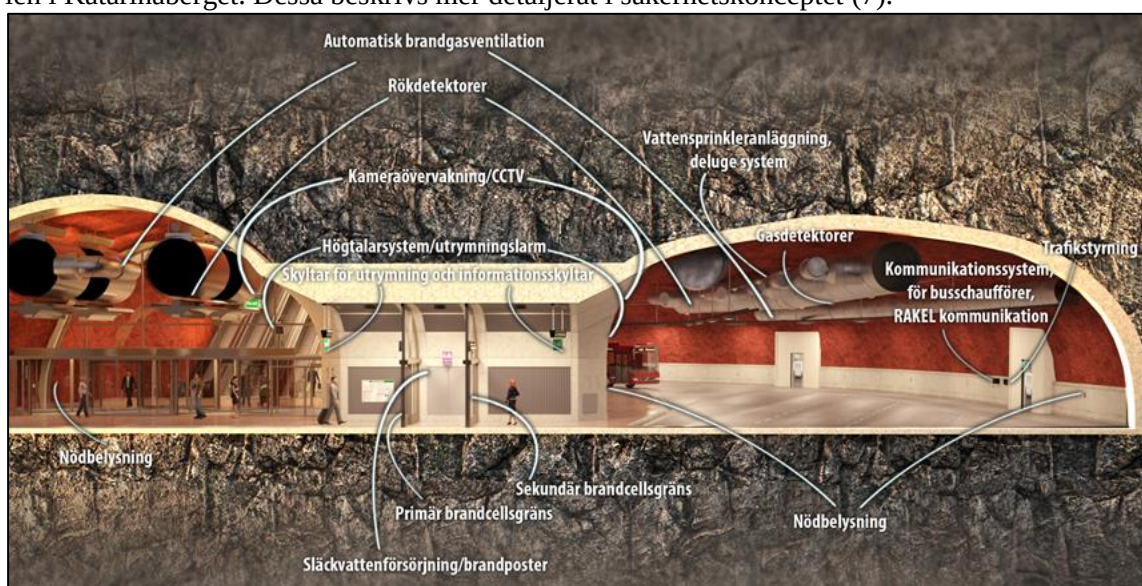
Räddningsinsats i undermarksanläggningar kräver särskilt beaktande av räddningsmanskapets säkerhet. Undermarksanläggningar i allmänhet utgör en utmaning för räddningstjänsten som har begränsade resurser till förfogande, vilket behöver beaktas vid utformningen. Förutsättningarna för insats i den planerade bussterminalen håller samma höga standard som i andra moderna trafikanläggningar såsom undermarksstationer med stora resenärströmmar samt väg- och tunnelbanetunnlar. Standarden är väsentligt bättre än i många befintliga anläggningar med långa insatsvägar och sparsmakade säkerhetskoncept. Tillträdesvägar för räddningstjänsten i bussterminalen utgörs av entréer och utrymningsvägar vilka ingår i ett insatskoncept som tagits fram i samråd med Storstockholms brandförsvär. Dessutom finns ett separat insatstrapphus i nära anslutning till räddningstjänstens primära insatsväg från Katarnavägen. Utrymmet där trapphuset mynnar är brandtekniskt avskilt från både vänthall och bussköryta. Utöver särskilda insatsvägar ingår ett flertal insatsstödjande system i detta koncept, se vidare särskild handling med anläggningens säkerhetskoncept (7).

4.2.5 Omhändertagande av släckvatten

En risk som kan få påverkan på naturmiljön är släckvatten från bussterminalen. Vid en aktivering av bussterminalens sprinklers kommer ett intensivt vattenflöde att starta och släckvattnet måste kunna ledas bort och omhändertas. Tidigare utredningar har analyserat olika lösningar för omhändertagande av kontaminerat släckvatten. Beslut har fattats av Stockholms stads Miljö- och hälsoskyddsnämnd (29) att släckvatten bland annat kan hanteras genom utläggning av läns vid utsläppspunkten i Saltsjön. Detta säkerställs genom en beredskap hos driftansvariga för bussterminalen.

4.2.6 Sammanfattning av säkerhets- och skyddsåtgärder

En sammanfattande illustration visar de skydds- och säkerhetsåtgärder som vidtagits för bussterminalen i Katarinaberget. Dessa beskrivs mer detaljerat i säkerhetskonceptet (7).



Figur 13. Säkerhets- och skyddsåtgärder. De i bilden angivna funktionerna och de säkerhetstekniska installationerna i övrigt avser delar av funktioner i säkerhetskonceptet för bussterminalen. Denna figur utgör preliminärt utförande på principiell nivå och kan komma att anpassas i nästa skede.

5 Nollalternativet

Enligt 6 kap, 12 § miljöbalken ska en MKB innehålla ”en beskrivning av miljöförhållandena och miljöns sannolika utveckling om planen inte genomförs”, det så kallade nollalternativet. Eftersom planområdet kommer att tas i anspråk för en verksamhet som finns uppräknad i plan- och bygglagen 4 kap 34 §, så ska MKB:n, enligt 6 kap 7 § miljöbalken även innehålla ”en beskrivning av konsekvenserna av att verksamheten eller åtgärden inte kommer till stånd”. Nollalternativet innebär inte nödvändigtvis att allting förblir som i dagsläget, utan handlar om vilken utveckling som är trolig om den planerade detaljplanen inte blir av.

En sannolik utveckling om detaljplanen för bussterminalen vid Slussen inte blir av är att den tillfälliga bussterminalen på Stadsgården kvarstår under längre tid alternativt ersätts med en tillfällig bussterminal vid Stadsgårdskajen. Två olika alternativ placeringar utreds. En möjlig placering är på Stadsgårdskajen. En annan möjlig placering är på ponton som förankras vid kajplats 153 på Stadsgårdskajen väster om Birkaterminalen. Inom ramen för Slussens miljödom finns möjligheten att lägga den temporära bussterminalen på ponton om detta skulle behövas för logistiken vid färdigställandet av Slussen. Konsekvenser av nollalternativet är bland annat att Stadsgårdsleden inte kan överdäckas och att den nya Katarinaparken och de byggnader som planeras ovanpå överdäckningen inte kan färdigställas i enlighet med den lagakraftvunna detaljplanen för Slussen. Att behålla den provisoriska bussterminalen under en längre tid innebär också att återläggningen av Saltsjöbanans slutstation, vilken planeras inom berört område, försvåras eller försenas. Detta får i sin tur troligen till följd att Saltsjöbanan kommer att ha slutstation i Henriksdal med anslutningsbuss till Slussenområdet under längre tid. Slussen förblir en byggarbetsplats utan färdigställda ytor och stråk för rekreation och rörelse i och genom området under längre tid än om den planerade detaljplanen för en ny bussterminal vid Slussen genomförs.

Ovan beskrivna lösningar och dess konsekvenser är temporära. Hur lång tid som den tillfälliga bussterminalen kan ligga kvar på Stadsgårdskajen eller ponton är inte fastlagt. På längre sikt bedöms Slussen behöva färdigställas i enlighet med den lagakraftvunna detaljplanen och det genomförandebeslut som Stockholms kommunfullmäktige fattat som anger att detaljplanen för Slussen ska genomföras.

Det innebär att den samlade omstigningspunkten för bussar vid Slussen försvinner. Ett möjligt scenario om verksamheten inte kommer till stånd, det vill säga ingen ny bussterminal anläggs inom Slussenområdet, är att bussarna sprids ut till olika platser, exempelvis befintligt gatunät vid Slussen. Inom Slussenområdet skulle vissa bussar kunna stanna vid gatan och därefter huvudsakligen vända exempelvis mot Katarinavägen eller vid Gamla stan och sedan köra tillbaka mot Nacka och Värmdö.

Trafikförvaltningens kapacitetskrav kan inte uppnås vilket innebär att busstrafiken behöver dras ner med följd att en större andel resenärer får välja alternativa färdmedel. Syftet med den föreslagna detaljplanen kan således inte uppnås.

Om den planerade tunnelbanan till Nacka och bussterminalen i Nacka C är anlagda vid denna tidpunkt kommer belastningen på dessa troligen att öka markant. Om den föreslagna detaljplanen för bussterminalen vid Slussen inte genomförs är det också möjligt att Stockholms stad påbörjar en ny planprocess för någon av de alternativa lokaliseringar som studerats inom Slussenområdet. Dessa lösningar och deras konsekvenser finns översiktligt beskrivna i alternativredovisningen (30) under alternativa lokaliseringar och beskrivs således inte närmare under nollalternativet.

Det kan inte heller uteslutas att de regionala förutsättningar och överväganden som legat till grund för framtagandet av denna detaljplan skulle kunna revideras i nollalternativet, men dessa överväganden sker på en regional nivå och bedöms inte inom ramen för denna planprocess.

6 Riskinventering och riskidentifiering

För att kartlägga olika olyckshändelser och riskkällor har en övergripande riskinventering utifrån de tre perspektiven, beskrivna i avsnitt 2.3.1, genomförts. För att få en så heltäckande analys som möjligt har utgångspunkten varit att identifiera olyckshändelser inom ramen för behovsbedömningen som kan ha påverkan på planområdet. Som en första analys har sedan en översiktlig bedömning gjorts utifrån om det sker en förändring i risknivå.

De bussar som ska utnyttja bussterminalen ankommer till Slussen österifrån på väg 222. De passerar sedan samma sträcka längs Stadsgårdsleden ungefär till och med Fotografiska muséet, där de olika utredningsalternativen sedan skiljer sig åt.

6.1 Medverkande intressenter

Följande intressenter har i något skede under projektets gång intervjuats och/eller medverkat på möten i anslutning till riskinventeringen:

- Storstockholms brandförsvär.
- Länsstyrelsen i Stockholms län.
- Exploateringskontoret i Stockholms stad.
- Trafikförvaltningen.

6.2 Resultat av riskidentifiering för nuläget

Nedan presenteras de risker som bedömts ge påverkan på nuläget.

6.2.1 Risker i bussterminal

- Trafikolycka
- Brand i buss.
- Brand i vänthall.

6.2.2 Antagonistisk handling

- Terrorism eller sabotage (spridning av ämne genom ventilationssystem, påverkan på bärande konstruktion, uppsyn av omgivningen utanför bussterminalen).

6.2.3 Risker utanför bussterminal

- Höga höjder och suicidrisker.
- Olycka med gasformiga drivmedel.
- Transport av farligt gods på Stadsgårdsleden.
- Transporter av farligt gods på södra stambanan.
- LNG-hantering hos Viking Line.
- Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna.
- Drivmedelsstation OK/Q8 på Katarinavägen.
- Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister.

- Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss.
- Ursårning av tunnelbanevagnar.
- Påseglingsrisker.
- Havererande helikopter.
- Nedfallande delar från brokonstruktion.

6.3 Resultat av riskidentifiering för huvudalternativet

För huvudalternativet har ett stort antal risker identifierats i inventeringsfasen. Nedan presenteras de risker som tas med i den fortsatta analysen.

6.3.1 Risker i bussterminal

- Trafikolycka
- Brand som påverkar fordonsgas i normalbuss.
- Brand som påverkar fordonsgas i dubbeldäckare.
- Brand i buss inom terminalens busskörytor och in- och utfartstunnel.
- Brand inom vänthall.
- Brandspridning mellan galleria och bussterminal.

6.3.2 Antagonistisk handling

- Terrorism eller sabotage (spridning av ämne genom ventilationssystem, påverkan på bärande konstruktion, uppsyn av omgivningen utanför bussterminalen).

6.3.3 Risker utanför bussterminal

- Höga höjder och suicidrisker.
- Mynning av utrymningsväg vid Entré Lokatten.
- Mynningar av utrymningsvägar från in- och utfartstunnel.
- Olyckor på Stadsgårdsleden.
- Transporter av farligt gods på södra stambanan.
- LNG-hantering hos Viking Line.
- Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister.
- Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss.
- Ursårning av tunnelbanevagnar.
- Påseglingsrisker.
- Havererande helikopter.

6.4 Resultat för riskidentifiering för nollalternativet

Nedan presenteras resultatet från genomförd riskinventering för nollalternativet.

6.4.1 Risker i bussterminal

- Trafikolycka
- Brand i bussterminal ovan mark.
- Brand i vänthall.

6.4.2 Antagonistisk handling

- Terrorism eller sabotage (spridning av ämne genom ventilationssystem, påverkan på bärande konstruktion, uppsyn av omgivningen utanför bussterminalen).

6.4.3 Risker utanför bussterminal

- Höga höjder och suicidrisker.
- Olyckor på Stadsgårdsleden.
- Brand i bussterminal ovan mark.
- Olyckor på Katarinavägen.
- Olycka med gasformiga drivmedel.
- Transporter av farligt gods på södra stambanan.
- LNG-hantering hos Viking Line.
- Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna.
- Brand i bussköryta eller vid infart till bussterminal.
- Påseglingsrisker.
- Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister.
- Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss.
- Stor olycka i Stadsgårdsledens tunnel.
- Ursårning av tunnelbanevagnar.
- Havererande helikopter.

7 Riskuppskattning

Nedan presenteras riskuppskattningen för de identifierade riskerna.

7.1 Riskuppskattning för nuläget

För nuläget presenteras nedan en uppskattning av riskernas storlek. En inledande bedömning har gjorts att några av riskerna inte tas med i den vidare bedömningen. Dessa är

- Havererande helikopter. För en olycka med helikopter i taxiverksamhet utgående från helikopterplattan vid Gamla stan, väster om Centralbron, är slutsatsen att denna är acceptabel med tanke på antalet turer som går, rådande olycksstatistik och de restriktioner som föreligger för flygning i tätbebyggda områden.
- Påseglingsrisker. En påsegling av Stadsgården skulle sannolikt skapa vibrationer i marken, men bedöms inte vara av sådan karaktär att de skapar en olycksrisk för människor som befinner sig inom verksamhetsområdet. Risken bedöms som obetydlig.

7.1.1 Risker i bussterminal

7.1.1.1 Trafikolycka

En kollision mellan bussar bedöms ske i relativt låg hastighet inom bussterminalen. Övergångsställen mellan påstigningsrefugerna finns för resenärer. Busschaufförers väg till och från uppställningsplats för bussar är inte ljusreglerad eller markerad med övergångsställen och risken bedöms därför vara påtaglig.

7.1.1.2 Brand i buss

En brand i buss bedöms medföra en hög effekt- och rökutveckling. Bussterminalens relativt öppna konstruktion medför att den naturliga ventilationen kommer kunna undanröja brandgaser. Risken bedöms vara obetydlig.

7.1.1.3 Brand i vänthall

En brand i vänthallen inomhus bedöms medföra en obetydlig risk och kunna hanteras av det befintliga brandskyddet. Avskiljningen från vänthall gentemot tunnelbanan har inte detaljstuderats inom ramen för denna riskbedömning. En brand inom väntzonerna utomhus, dvs. påstigningsrefuger, bedöms utgöra en obetydlig risk.

7.1.2 Antagonistisk handling

Antagonistiska handlingar är svårdefinierade för nuläget. Anlagd brand bedöms kunna vara en vanligt förekommande antagonistisk handling. Den vanligaste anlagda branden är sannolikt liten, t.ex. brand i sopkorg bland bebyggelsen på Katarinaberget eller vid drivmedelsstation OK/Q8. En anlagd brand i drivmedelsstationen kan få potentiellt allvarliga konsekvenser, men bedöms samtidigt som den hanteras av det ordinarie brandskyddet och närvarande personal. Antagonistisk handling bedöms även som möjlig för Saltsjöbanans spårområde. Tillträde till spårområdet bedöms regleras genom staket. Sammanfattningsvis bedöms risken som obetydlig för antagonistisk handling.

7.1.3 Olyckor utanför bussterminal

7.1.3.1 Höga höjder och suicidrisker

Från Katarinavägen ner till Saltsjöbanans spår och Stadsgårdsleden är det uppskattningsvis cirka 40 meter. I dagsläget är den befintliga muren längs Katarinavägens trottoar cirka 1,20 meter hög. Denna vägsträcka har genom åren varit plats för flertal självmord. Risken bedöms som påtaglig.

7.1.3.2 Olycka med gasformiga drivmedel

Vid användning av gasformiga drivmedel i fordon som passerar på Stadsgårdsleden kan ett antal scenarier uppkomma. Tryckuppbyggnad från ett utsläpp med påföljande explosion uppskattas bli begränsad med tanke på att fordonet befinner sig i det fria. Dock stort antal skadade till följd av kärlsprängning, jetflamma och fördröjd antändning av gasmoln.

7.1.3.3 Transport av farligt gods på Stadsgårdsleden

Eftersom Stadsgårdsleden är undantaget den förbudszon som är utpekad av Länsstyrelsen (31) får farligt gods transporteras här, dock inte transporter i tank eller tankcontainers med vissa gaser eller brandfarliga vätskor i lasten. Farligt gods-olycka bedöms ha obetydlig risk för nuläget.

7.1.3.4 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Sannolikheten bedöms som låg för farligt gods-olycka på södra stambanan; relativt sett få tåg per dygn passerar Slussen med ämnen som har långa konsekvensavstånd. För tåg som ska passera Stockholms central finns begränsningar i typ och kvantitet som får transporteras. Dessa restriktioner får då indirekt positiv påverkan på övriga platser där tåget passerar. Farligt gods-olyckor har potentiellt långa konsekvensavstånd och vissa ämnen skulle kunna få spridning mot planområdet, men frekvensen av passerande tåg med farligt gods är begränsad och risken bedöms därför sammantaget som obetydlig för att en olycka skulle ske när transporten passerar Slussen.

7.1.3.5 LNG-hantering hos Viking Line

Viking Lines båt Grace drivs av flytande naturgas (Liquified Natural Gas, LNG). Hanteringen sker till sjöss från bunkerbåt som angör fartygets yttre sida och påbörjar bunkring. Ett gasutsläpp skulle upptäckas av personal som stoppar lossningen. Om antändning av utsläppet skulle ske bedöms det som att konsekvensen från explosionen inte innebär olycksrisk för planområdet i nuläget; avståndet mellan Viking Lines närmsta kajplats och planområdet uppgår till mer än 500 meter.

7.1.3.6 Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna

Bunkringsbåt är förlagd på fartygets utsida, dvs. fartyget utgör barriär mot planområdet. Fartygsbränsle är inte lättantändligt och bunkringen är övervakad av personal som omedelbart avbryter lossningen vid ett läckage och vidtar brandsläckningsåtgärder om så är nödvändigt.

7.1.3.7 Drivmedelsstation OK/Q8 på Katarinavägen

Transporter till området sker via Katarinavägen och kommer österifrån. Transporterna sker med lastbil utan släp och kan maximalt transportera en volym om cirka 17 m³. Det sker fyra till fem leveranser i veckan och vid leverans kommer leverantören oftast med blandade bränslen, dvs. inom tankbilen finns olika fack som kan innehålla olika ämnen. Alla leveranser kör i regel bensin (95-oktanig) i minst en tank.

De risker som identifierats är transporten av drivmedel, lossning från tankbil, tankning av fordon samt att tankbilen tar fel körväg och därmed transporterar brandfarliga varor på vägar som inte är avsedda för transporter av farligt gods. Riskerna uppskattas till att vara påtagliga utifrån drivmedelsstationens närhet till omkringliggande bebyggelse, närhet till busshållplatser, närliggande gångväg/trappa till Klevgränd samt att begränsat utrymme finns i trafikmiljön.

7.1.3.8 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Passage över övergångsställen bedöms kunna utgöra en risk för fotgängare och cyklister på en så trafikintensiv plats som Slussenområdet. Risken bedöms som betydande.

7.1.3.9 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

Från vänthall inomhus måste trafikerade övergångsställen i samma plan passeras för att nå bussarna. För nuläget bedöms risken påkörning för bussresenärer inom bussterminalen som betydande.

7.1.3.10 Urspårning av tunnelbanevagnar

Vid urspårning av tunnelbanevagnar vid tunnelns mynning ovan bussterminalens västra del finns två scenarier; de stannar kvar på spåret på bron eller de faller ned i bussterminalen. Nedfallande tunnelbanevagnar bedöms ge allvarliga konsekvenser, men sannolikheten för sådan urspårning bedöms som obetydlig. Den sammanlagda risken bedöms vara obetydlig.

7.1.3.11 Nedfallande delar från brokonstruktion

Bron har konstaterats ha svaga punkter och delar av betongkonstruktionen har lossnat i omgångar. Fortlöpande kontroller och besiktning av konstruktion sker, men viss risk bedöms finnas. För människor som befinner sig på påstigningsrefugerna bedöms nedfallande betong utgöra en påtaglig risk.

7.2 Riskuppskattning för huvudalternativet

Inledningsvis presenteras i detta avsnitt en kort översikt av fordonsgas och om brand i bussterminal under mark.

7.2.1 Kort om fordonsgas

I dagsläget saknas olycksstatistik avseende trafikering av liknande undermarksanläggningar med bussar som drivs med fordonsgas. Däremot finns exempel på olyckor som inträffat på ytvägnätet, som påvisar att olika scenarier med potentiellt stora konsekvenser kan uppkomma. Därför finns särskilda skäl att fördjupa riskutredningen kring just denna riskkälla.

Fordonsgas kan vara såväl förnybar (biogas) som fossil (naturgas). I båda fall är den huvudsakliga beståndsdelan metan. Den fordonsgas som driver SL:s bussar består vanligen av en blandning och naturgas och biogas där merparten av molekylerna är förnybara, dvs. biogas. Metan är en mycket brandfarlig gas.

I dagsläget förvaras fordonsgasen i gasflaskor av stål eller kompositmaterial på bussens tak eller under golvet, beroende på tillverkare. Gastankarnas volym beror på hur många gasflaskor som nyttjas. För större ledbussar är den totala lagringskapaciteten cirka 400 Nm³. Gasen lagras vid ett tryck motsvarande 200 bars övertryck vid 15 °C. Tanken skyddas mot övertryck vid brand av smältsäkringar. (32) En viktig förutsättning i framtagandet av detaljplanen för bussterminalen är att gasdrivna bussar ska kunna trafikera terminalen och särskild riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal, se Appendix A, har därför tagits fram. Denna riskbedömning har därför utgått från att samtliga bussar i kollektivtrafik ska kunna drivas av biogas.

7.2.1.1 Inträffade olyckor

En olycka med biogasdrivna bussar inträffade i Helsingborg den 14 februari 2012. En buss kolliderade med en stillastående buss och passagerarna och förarna utrymde bussarna som började brinna. Ingen människa skadades, men de båda bussarna totalförstördes. Bussarna, som gick i stadstrafik, hade inga tekniska brister på bromssystem eller däck. Båda bussarna drevs med biogas och den påkörda bussen var försedd med ett fast släcksystem i motorrummet. Släcksystemet fungerade inte som avsett och släckte inte branden som uppstod. Den undersökning som gjorts visar att en dysa hade lossnat vilket medförde att släckverkan inte var tillräcklig och bussarna övertändes. (33)

Haverikommissionens sammanfattning och rekommendationer berör inte bussarnas system för fordonsgas eller utformning av anläggningar som trafikeras med sådana fordon. Haverikommissionens rekommendationer berör:

- Räddningstjänsten rutiner vid insats i bussar och i bussar med fordonsgas.
- Fasta släcksystem för motorrum i bussar.
- Kontroll av släcksystems funktion i den ordinarie fordonsbesiktningen.

- Yrkesförarutbildningen för bussförare utökas och anpassas med övningar inom brandsäkerhet och utrymning.

Utredningen befäster även att olyckor med biogas som drivmedel kan medföra hastiga förlopp och att potential till stor skada därmed finns. Ett antal olika scenarier med sådan händelseutveckling studeras närmare i denna rapport och kartläggningen av sådana scenarier utgör en del av den vidare riskidentifieringen.

Ytterligare olyckor med biogasdriven buss kan nämnas. Den 29 oktober 2012 utbröt en brand i en naturgasdriven regionbuss i Wassenaar i Holland. Efter föraren hade stannat bussen och passagerarna hade evakuerats, spreds branden från motorrummet till resten av bussen. Branden orsakade att gasflaskorna på taket på bussen värmdes upp varpå gasflaskornas säkerhetsventiler aktiverades för att förhindra gasflaskorna från att explodera. Horisontella lågor med 15 till 20 meters längd sköt ut från gasflaskorna. (34)

Under sommaren 2016 började en fordonsgasdriven buss i Göteborg att brinna under färd. Olyckan är inte färdigutredd men en möjlig orsak är elfel i ledningar i bussens tak. Resenärerna evakuerades och kylning av bussen påbörjades. Under räddningstjänstens insats uppstod en explosion.

De olyckor som presenterats ovan bekräftar, trots att alla olycksutredningar inte presenterats ännu, att de scenarier som är studerade i denna riskbedömning är relevanta och att de inträffade olyckorna täcks in av de olycksscenarier som utretts i denna riskbedömning.

7.2.2 Generellt om brand inom bussterminal under mark

Brand inom bussterminalen har i samband med projekteringen identifierats som en kritisk händelse med hänsyn till den förväntade höga persontätheten och de kraftiga bränder som kan uppstå då bussar involveras i en brand. Studier av bussbränder (35) har visat att brandtillväxten är väldigt snabb och på kort tid generera höga effekter, uppemot 30 MW. Genom den snabba tillväxten och de höga brandeffekterna som kan uppstå, genereras stora volymer brandgaser vilka snabbt leder till kritiska förhållanden för utrymmande personer. De snabba och kraftiga brandförloppen genererar även stora påfrestningar på bärande konstruktioner som vid ett ras kan generera följd effekter och skada utrymmande personer och räddningstjänstens personal.

Nedan följer de identifierade riskerna från riskinventeringen upp och storleken på risken beräknas eller uppskattas.

Av de identifierade riskerna görs en inledande bedömning att ett antal av riskerna inte tas med i den vidare bedömningen. Dessa är desamma som för nuläget samt följande:

- Drivmedelsstation OK/Q8 på Katarinavägen. Stationen har avvecklats under 2016 och kommer därmed inte finnas kvar för huvudalternativet.
- Stor olycka i Stadsgårdsledens tunnel. Bedöms inte medföra riskpåverkan för bussterminalen tack vare långt avstånd, uppskattningsvis överstigande 280 meter, mellan tunnelmynningarna.
- Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna. Bunkringsbåt är förlagd på fartygets utsida, dvs. fartyget utgör barriär mot planområdet. Bränslet är icke lättantänt och bunkringen är övervakad av personal som omedelbart avbryter lossningen vid ett läckage och vidtar brandsläckningsåtgärder om så är nödvändigt.

7.2.3 Risker i bussterminal

Då terminalen förläggs under mark ställs stora krav på byggnadsverkets brandskydd. I systemhandlingen finns en projekterad lösning för bussterminalens brandskydd framtiden, men detaljprojekteringen kvarstår, varför vissa förändringar kan komma att ske under den vidare projekteringen.

7.2.3.1 Trafikolycka

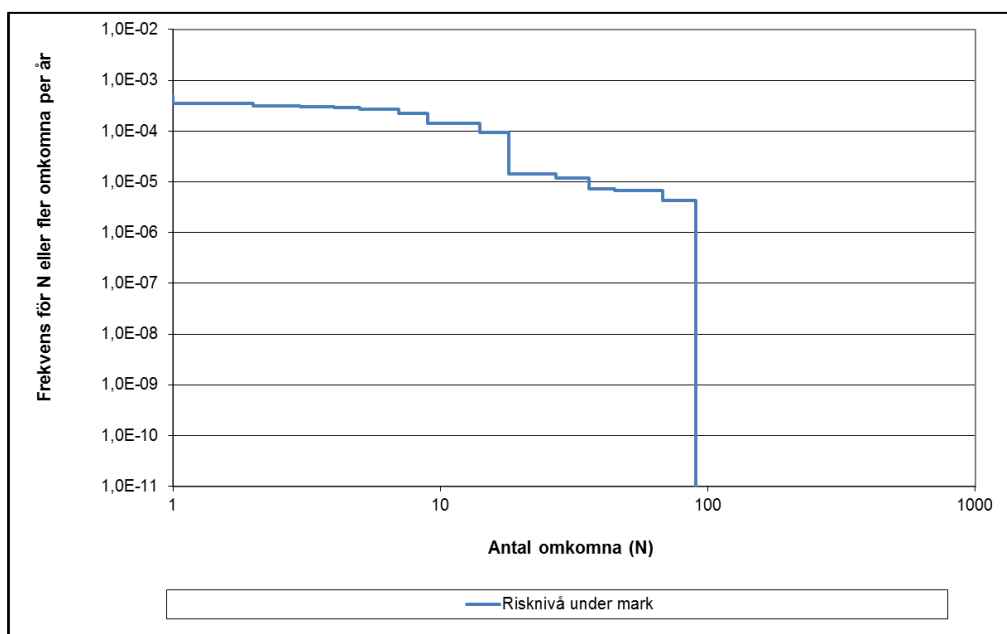
En kollision mellan bussar bedöms ske i relativt låg hastighet inom bussterminalen. Resenärer kommer ledas direkt till respektive från buss till vänthallen. Busschaufförers väg mellan vänthallen och reglerplatser för bussar är inte ljusreglerad eller markerad med övergångsställen. Busschaufförers tillgång till pausutrymme finns dock tagit hänsyn till inom projektet, se markering G i Figur 12 för placering, vilket bedöms medföra färre passager över busskörytan. Risken bedöms vara påtaglig.

7.2.3.2 Brand som påverkar fordonsgas i normalbuss

Beräkningar har utförts avseende bussar med fordonsgas, se Appendix A. Följande scenarier har beaktats:

- Hål på högtrycksledning och explosion.
- Utsläpp smältsäkring och explosion.
- Extremt haveri (kärlsprängning).
- Hål på högtrycksledning och jetflamma.

Resultaten av beräkningarna visar att följande risknivå uppnås:

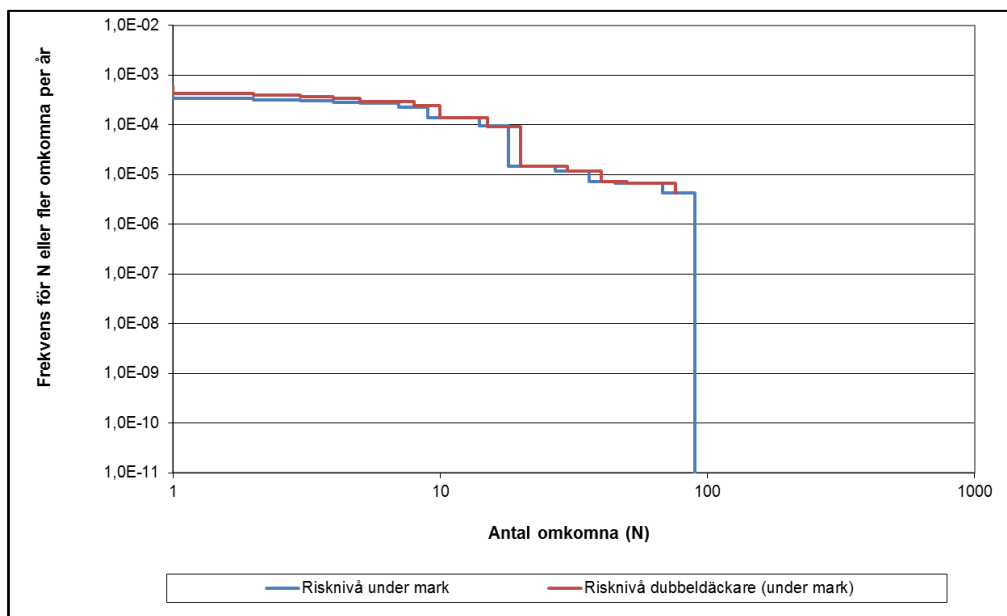


Figur 14. Samhällsrisk till följd av brand- och explosionsscenarioer vid trafikering av anläggningen med bussar som drivs med fordonsgas uttryckt med riskmålet F/N-kurva.

I riskanalysen som redovisas i Appendix A har ett förväntat antal omkomna till $4,5 \times 10^{-3}$ per år (medelrisk) beräknats. För beräkning av individrisken i bussterminalen används ett prognostiserat personflöde för bussterminalen om 44 000 resor per dygn som utgångspunkt. Varje pendlare antas göra två passager genom bussterminalen per vardagsvinterdygn, dvs. 22 000 resenärer. Detta ger en sannolikhet på $2,05 \times 10^{-7}$ att omkomma per år vid pendling (individrisk).

7.2.3.3 Brand som påverkar fordonsgas i dubbeldäckare

Slussens bussterminal är dimensionerad utifrån att det befinner sig cirka 75 personer i varje normalstor buss. Systemhandlingen har dock som förutsättning att trafikering med dubbeldäckare ska vara möjlig. Om dubbeldäckare skulle trafikera bussterminalen innebär detta att fler personer finns i varje buss, och att något fler personer kan påverkas av de olika olycksscenarioerna. En dubbeldäckare kan inrymma fler passagerare, men antal utgångar är detsamma som för en normalbuss. Risknivån för bussterminalen då dubbeldäckare med 85 personer används redovisas nedan i Figur 15.



Figur 15. Samhällsrisik fordonsgas för normalbuss och dubbeldäckare för brand- och explosionsscenarioer.

7.2.3.4 Brand i buss inom terminalens busskörytor samt in- och utfartstunnel

Busskörytor samt in- och utfartstunnel är att betrakta som anläggningar och omfattas därmed av Plan- och Bygglagen, men inte av Boverkets Byggregler, som beskrivits i avsnitt 2.5.3 och 7.2.3. I brand-skyddsprojekteringen har brand beaktats ur olika synvinklar. Brandbelastning, dvs. den totala potentiella utvecklade värmeenergin under ett fullständigt brandförlopp, i busskörytan samt in- och utfartstunneln bedöms likna den som återfinns för vägtunnlar varpå dimensionering av den bärande konstruktionen sker utefter rekommenderad kurva i Trafikverkets TRVK Tunnel 11. Lämpligheten av användandet av denna standardbrandkurva, den s.k. HC-kurvan som beskrevs i avsnitt 4.2.2, har även utretts särskilt och funnits ge tillfredsställande skyddsnivå.

Brand- och explosionslast för bussarna har likaså analyserats i separat utredning. Bussterminalen kan komma att trafikeras av bussar drivna med ett antal olika bränslen, såsom etanol, biodiesel, elhybrider och fordonsgas. Riskerna med bussar som drivs av tryckkomprimerad fordonsgas bedöms vara dimensionerande och därmed representativa även för vissa andra bränslen såsom etanol, biodiesel och elhybrider.

I in- och utfartstunneln finns risk för köbildning i de fall bussar inte avgår i tid ut ur terminalen. En olycka i det läget analyserades därför i projekteringen och utrymning och tekniska lösningar dimensionerades därefter. Bussterminalen är, med drift av fordonsgasbussar och med tanke på anläggningens utformning under mark, en anläggning där kravnivån på tidig detektion är viktig. Anläggningen har också bedömts behöva kombinationer av larmsystem för att uppnå en tidig detektion i händelse av ett utsläpp eller olycka.

7.2.3.5 Brand inom vänthall

Vänthallen, se Figur 16, är, som beskrivet i avsnitt 2.5.3, att betrakta som en byggnad och är därmed hanterad utifrån de krav som ställs i Boverkets Byggregler. En brand i bussterminalens vänthall har därför analyserats ingående och hanteras i den vidare projekteringen. Inom resenärsytan bedöms brandbelastningen, dvs. total potentiell utvecklad värmeenergi under ett fullständigt brandförlopp, understiga 250 MJ/m^2 (golvarea).

En projekteringsförutsättning för vänthallen mot bakgrund av god resenärsmiljö är att barriären gentemot busskörytan ska utgöras av glas. Denna avskiljande konstruktionen har därför dimension-

erats efter en explosion med fordonsgas. En sådan explosion skapar ett kortvarigt högt övertryck, vilket följaktligen ställer höga krav på glaspartiet. En brand inom vänthallen medför inte de övertryck som fordonsgasen alstrar och brand bedöms därför inte kunna spridas ut till bussköryta genom att glaspartiet brister.



Figur 16. Illustration av planerad vänthall. Bild från Link Arkitektur.

7.2.3.6 Dieseldrivna bussar

I samband med att dessa brandrisker för fordonsgas redovisats är det också på sin plats att diskutera den idag vanligaste förekommande typen av drivmedel; diesel. Diesel är till skillnad från fordonsgas ett vätskeformigt bränsle och får i sammanhanget ses som ett svårantändligt ämne. Dess flampunkt, dvs. den temperatur då dieseln tillsammans med luft bildar en brännbar blandning, befinner sig vid cirka 55 °C. Vid hantering vid normalt tryck och temperatur finns ingen risk för antändning. Om dieseln, t.ex. vid en trafikolycka inom in- och utfartstunnel eller busskörytan, skulle läcka ut finns möjliga tändkällor i bussarnas heta motorer.

En brand i diesel utvecklar hög värmestrålning som i sin tur kan påverka omringgivande bussar. Brandförloppet från antändning till fullt utvecklad brand är förvisso kraftigt, men dock långsammare än för fordonsgas och chansen till detektion och reaktion av antingen skyddssystemen eller personalen torde vara god. Diesel ska även ses mot bakgrund att vätskan befinner sig på marken och inte stiger upp mot bussterminalens tak, något som fordonsgas gör vid ett utsläpp.

Bussar, oavsett drivmedel, brinner dock med en hög effektutveckling. Bussbränder startar i de allra flesta fall i motorrummet, där både varma oljor och plast- och gummidetaljer bidrar till skapandet av en kraftig brand. Säten är i regel utförda med flamskyddsbehandlat tyg, vilket innebär att de motstår t.ex. glöd från cigarett. Sätena är dock inte obrännbara och kommer därför till slut delta i brandförloppet. Det är därför viktigt att lyfta att en brand i undermarksanläggningen kommer ha betydande påverkan, men den påverkan kommer inte vara momentan utan tid för upptäckt och reaktion bedöms som tillräcklig för att utrymning ska kunna ske.

Brand i buss kan uppkomma som en följd av trafikolycka. En sådan brand bedöms ha ett långsamt brandförlopp till skillnad från ett brandförlopp som snabbt involverar diesel eller fordonsgas. Baserat på att brand uppkommer för endast en begränsad andel av de kollisioner som sker, bussarna körs av yrkeschaufförer samt att hastigheten är begränsad ger överslagsmässiga beräkningar en låg sannolikhet för brands uppkomst. Konsekvensen vid en sådan händelse bedöms vara begränsat till ett fåtal personer baserat på statistik från inträffade sammanstötningar mellan personbilar i tunnlar. Eftersom samt-

liga bedöms kunna hinna utrymma säkert vid en snabbare brand, blir en förutsättning för att någon skall skadas allvarligt eller omkomma vid brand i denna typ olycka är att personerna blir fastklämda. Statistiken visar att den absoluta merparten av sådana personbilsolyckor resulterar i en omkommen. (36) Antagandena bedöms därför vara mycket konservativa eftersom bussförare är välutbildade, bussterminalen trafiksäkrare än en sedvanlig tunnel eftersom tillträde för övrig trafik är förbjuden, bussterminalen har enkelriktad trafik och att resenärerna utanför bussen är mer skyddade tack vare vänthallens utformning.

7.2.3.7 Brandspridning mellan galleria och bussterminal

En identifierad additiv kumulativ risk är brandspridning mellan galleria och bussterminalen. Brand i gallerian utgör en riskkälla gentemot bussterminalen. Riskkällan befinner sig utanför planområdet men har bedömts utgöra en risk som kan sträcka sig in i planområdet. Båda byggnadsverken är analytiskt projekterade var och en för sig enligt BBR.

Om en brand i gallerian skulle ske samtidigt som brand sker i bussterminalen finns risk för brandspridning och även försvårad utrymning.

7.2.4 Antagonistisk handling

I systemhandlingen har antagonistiska handlingar tidigare analyserats översiktligt. De händelser som analyserats är terrorism eller sabotage som ses som illvilliga och illegala hot, där handlingen utgår från terrorister, irreguljära förband och organiserad brottslighet. Detta är i linje med den definition Myn-digheten för samhällsskydd och beredskap har av antagonistisk handling (37).

Anlagd brand bedöms kunna vara en vanligt förekommande antagonistisk handling i en anläggning som bussterminalen i Katarinaberget, dels för att den befinner sig under mark och dels för att den är en viktig punkt i infrastrukturen för staden. Den vanligaste anlagda branden är sannolikt liten, t.ex. brand i sopkorg, och hanteras genom det ordinarie brandskyddet. Det finns dock en risk för att en anlagd brand vilken är större än den brand som anläggningen dimensionerats för att kunna hantera leder till omfattande skador.

Genom ventilationssystemet kan giftiga gaser spridas i anläggningen, såsom pepparspray, tårgas eller gifter. Friskluftsintag till berganläggningen är en sårbar punkt.

7.2.5 Risker utanför bussterminalen

7.2.5.1 Höga höjder och suicidrisker

Från Katarinavägen ner till Saltsjöbanans spår och Stadsgårdsleden är det uppskattningsvis cirka 40 meter. I dagsläget är den befintliga muren längs Katarinavägens trottoar cirka 1,20 meter hög. Denna vägsträcka har genom åren varit plats för flertal självmord och i nuvarande planförslag kommer murens höjd att vara intakt. För denna risk gäller i övrigt samma information som i avsnitt 7.1.3.1.

7.2.5.2 Mynning av utrymningsväg vid Entré Lokatten

Östra utrymningsvägen från bussterminalen leder genom en gångtunnel under Saltsjöbanans spår ut mot Stadsgårdsleden. I dagsläget är här en gångbana i direkt anslutning till Stadsgårdsledens körbana. I det nya planförslaget behålls befintliga gångbanan, som kan uppfattas som smal och gångbanan befinner sig dessutom mycket nära biltrafiken på Stadsgårdsleden. Vid en utrymningssituation kommer de utrymmande människorna att kunna fortsätta bort från utrymningsvägens mynning i riktning mot Slussen och intilliggande ramp med gång- och cykelbana som leder bort från Stadsgårdsleden.

Människor skulle möjligen kunna ta sig över till Saltsjöbanans spår från gångvägen, men passerar i sådant fall nedfällda bommar och trafiksignaler som visar att passage inte är tillåten.

Viss risk för påkörning av utrymmande människor bedöms finnas på platsen, framför allt genom biltrafik.

Utformning av platsen för utrymningsvägens mynning är under utredning. I systemhandlingen redovisas en möjlig lösning som kommer vidareutvecklas och förfinas under bygghandlingsskedet inom ramen för det markanspråk och servitut som redovisas i detaljplanen.

7.2.5.3 Mynningar av utrymningsvägar från in- och utfartstunnel

Två utrymningsvägar finns i anslutning till in- och utfartstunneln. Den ena är en utrymningsväg lokaliserad i in- och utfartstunnelns norra bergvägg, ungefär i mitten av tunneln. Utrymningsvägen mynnar utomhus i en nisch i berget, mellan Saltsjöbanan och Stadsgårdsleden. Härifrån finns gångväg att använda för att förflytta sig från platsen bort mot Entré Lokatten. Viss risk för påkörning av utrymmande människor bedöms finnas på platsen till följd av närheten till biltrafik.

Den andra utrymningsvägen är in- och utfartstunnelns naturliga mynning i berget. Utrymning kan här ske i tråget som löper mellan Stadsgårdsleden och bergväggen. Viss risk för påkörning av utrymmande människor bedöms finnas på platsen, till följd av biltrafik som en följeffekt av att utrymmande personer vill ta sig vidare bort från området. Frågan om exakt utformning av platsen för dessa två utrymningsvägars mynning är under utredning. I systemhandlingen redovisas en möjlig lösning som kommer vidareutvecklas och förfinas under bygghandlingsskedet inom ramen för det markanspråk som redovisas i detaljplanen. Konceptet för utrymningen ut ur in- och utfartstunneln säkerställer att utrymmande når allmän platsmark på ett säkert sätt och att utrymmande befinner sig i säkerhet vid denna plats, t.ex. i tråget mellan in- och utfartstunneln och Stadsgårdsleden. Därifrån finns möjlighet för Stockholm stad att möjliggöra vidare förflyttning för utrymmande t.ex. via Söderbergs trappor eller genom att korsa Stadsgårdsleden när den stängts av från trafik med hjälp av normal ljusreglering eller via blåljusmyndigheternas försorg. Denna fråga behöver utredas vidare i samverkan med räddningstjänsten under kommande skede.

7.2.5.4 Olyckor på Stadsgårdsleden

I detta avsnitt belyses möjliga olycksrisker som skulle kunna påverka bussterminalen.

Eftersom Stadsgårdsleden är undantaget den förbudszon som är utpekad av Länsstyrelsen (31) får farligt gods transporteras här, dock inte transporter i tank eller tankcontainers med vissa gaser eller brandfarliga vätskor i lasten.

7.2.5.4.1 Brand i fordon

En brand i ett fordon i nära anslutning till in- och utfartstunnelns mynning skulle sannolikt generera hög värmestrålning och påverka trafikflödet, för bilister, yrkestrafik och kollektivtrafiken, negativt. Att branden skulle sprida sig in i bussterminalen bedöms som mycket osannolikt, dock skulle möjligen en liten andel brandgaser kunna spridas in i terminalen, men merparten skulle spridas för vinden.

7.2.5.4.2 Utsläpp av flytande kemikalier

Ett utsläpp av brandfarlig vara från ett fordon eller från en fordonslast i höjd med in- och utfartstunnelns mynning skulle kunna riskera att spridas in i tunneln och ned i bussterminalen.

VA-systemet på Stadsgårdsleden och i tunneln är projekterat med dagvattenbrunnar med jämna mellanrum om cirka 40 meter. Från Stadsgårdsleden sluttar infarten svagt uppåt i cirka 50 meter innan tunneln sedan börjar slutta nedåt till bussterminalen. Längs den uppåtlutande sträckan finns två brunnar. Ingen kantsten vid Stadsgårdsleden finns, utan slutningen är tilltagen att kunna förhindra stora vätskeansamlingar med påföljande rännilar, vilket kan vara fallet vid exempelvis skyfall. Genom denna lösning av VA-systemet skulle även ett utsläpp av andra vätskor kunna omhändertas och inte ledas ned i bussterminalen.

7.2.5.4.3 Utsläpp av övrigt farligt gods

Transporter av farligt gods kan innebära transporter av fasta, flytande eller gasformiga ämnen och blandningar. Ett fast ämne bedöms ge mycket lokal påverkan kring vägen och vara svåröflyttat i jämförelse med vätskor och gaser.

Ett gasutsläpp skulle sannolikt snabbt spädas ut av vinden, men man bör dock beakta att gaser uppför sig på olika sätt beroende på typ av gas. En tung gas som släpps ut i närheten av tunnelns mynning skulle lägga sig längs marken och vara beroende av luftströmmar omkring för att förflytta sig. En lätt gas skulle stiga uppåt och snabbt blandas ut. Typ av gas är också avgörande ifall det rör sig om t.ex. giftig, frätande eller brandfarlig gas. Sammantaget bedöms risken som obetydlig för att bussterminalen skulle påverkas av ett farligt gods-utsläpp på Stadsgårdsleden.

7.2.5.5 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Denna risk bedöms på samma sätt som för nuläget, se avsnitt 7.1.3.4.

7.2.5.6 LNG-hantering hos Viking Line

Denna risk bedöms på samma sätt som för nuläget, se avsnitt 7.1.3.5.

7.2.5.7 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Passage över övergångsställen bedöms kunna utgöra en risk för fotgängare och cyklister på en så trafikintensiv plats som Slussenområdet. Busstrafiken i nuläget kommer helt ha flyttats i huvudalternativet och de påkörningsolyckor som tidigare skett mellan cyklister och bussar eller fotgängare och bussar bedöms minska och bidrar till en förbättrad trafiksäkerhet. Risken bedöms därför som obetydlig för huvudalternativet.

7.2.5.8 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

För huvudalternativets bussterminal kommer övergången från tunnelbana till bussterminal ske inomhus och ingen kontakt med vägtrafik sker, se Figur 17. För kryssningsresenärer som ska fortsätta med buss är det i dagsläget oklart om entré kommer finnas i bussterminalens östra ände. I det fall Entré Katarinavägen utgör den närmsta ingången till bussterminalen kommer dessa resenärer att ändå kunna ta sig dit utan att passera plankorsningar med vägtrafik. Detaljplan för Slussen anger att Stadsgårdsleden kommer överdäckas och det är därför sannolikt att passage kan ske ovan överdäckningen. Utredning om exakt utformning pågår. Risken för bussresenärer bedöms som obetydlig.



Figur 17. Illustration av planerad utformning av avstigningsplats i bussterminalen. Bild från Link Arkitektur.

7.3 Riskuppskattning för nollalternativet

Här uppskattas risknivån, kvantitativt eller kvalitativt, för nollalternativet. För nollalternativet sker riskuppskattningen för bussterminalens temporära placering vid Stadsgården samt att bussarna på längre sikt sprids ut till olika platser, exempelvis befintligt gatunät vid Slussen.

7.3.1 Risker i bussterminal

7.3.1.1 Trafikolycka

En kollision mellan bussar bedöms även här ske i relativt låg hastighet inom bussterminalen. Resenärers väg mellan vänthall och buss förutsätts vara kort. Busschaufförers väg till och från uppställningsplats för bussar har oklar utformning. Risken bedöms vara påtaglig.

7.3.1.2 Brand i bussterminal ovan mark

Detta avsnitt syftar till att ge en bild av risknivån för en bussterminal med fordonsgas ovan mark. För riskuppskattning av nollalternativet utgör den en viktig del eftersom bussterminalen i nollalternativet temporärt kan komma att placeras vid Stadsgårdsleden, på kaj eller på ponton.

Redovisad risknivå för Slussens bussterminal avseende bussar som drivs med fordonsgas omfattar olycksrisker inom ett stort spektrum av olyckor med varierande allvarlighetsgrad där vissa har potentiellt stora konsekvenser, cirka 100 omkomna. Dessa konsekvenser beror till stor del av konsekvenser som skapas momentant när delar i bränslesystemets ingående delar av olika anledningar fallerar eller brister, t.ex. kärlsprängning. Dessa konsekvenser beror inte på att anläggningen är placerad under mark utan motsvarande olyckor kan inträffa i anläggningar ovan mark utomhus. Detta skulle vara fallet då bussterminalen temporärt placeras på Stadsgårdsleden. Figur 18 nedan visar risknivån för en anläggning som placeras utomhus ovan mark, jämfört med Slussens bussterminal under mark. De scenarier som är aktuella med bussterminal under mark, men som anses ej medföra konsekvenser ovan mark är:

- Stort hål på högtrycksledning och explosion.
- Utsläpp smältsäkring och explosion.

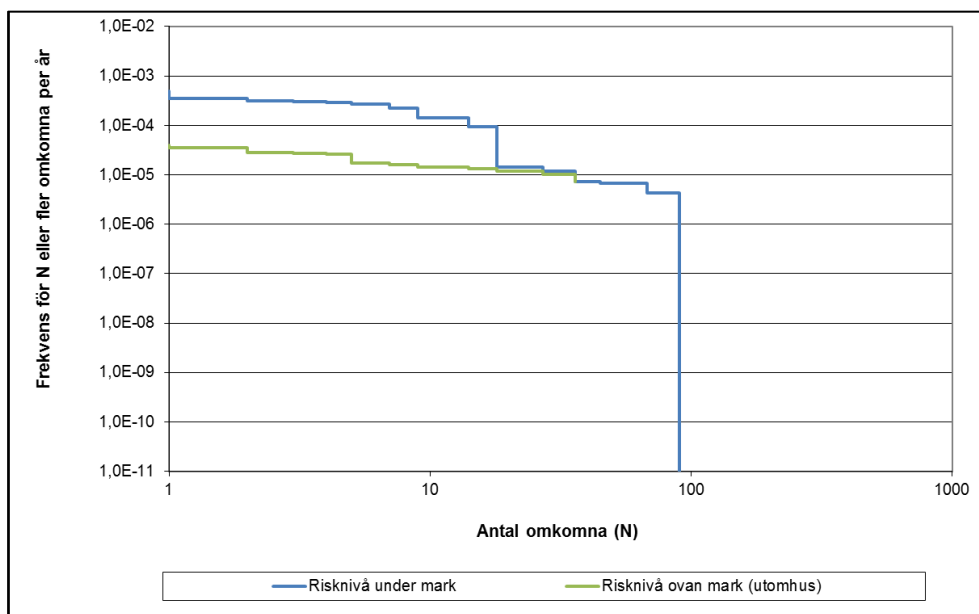
Att explosion ska kunna ske här innebär ett fördröjt förlopp. Explosion bedöms inte ske momentant när utsläppet startar. Utomhus är ventilationen mycket god och tändkällor i fria luften saknas. De scenarier som anses aktuella både ovan och under mark är:

- Extremt haveri (kärlsprängning).
- Stort hål på högtrycksledning och jetflamma.
- Medelstort hål på högtrycksledning och jetflamma.
- Utsläpp smältsäkring och jetflamma.

Påverkan bedöms kunna ske från olycka med gasformiga ämnen för bussterminalen när den är förlagd på ponton, men risken uppskattas vara obetydlig tack vare snabb utspädning av gas i utomhusluften. Vid tillfällig placering av bussarna i andra delar av staden är utformningen oklar, men samma princip om snabb gasutspädning vid öppen parkeringsyta bedöms kunna appliceras. Dock är bebyggelse närmare placerad, men särskild hänsyn till trafikering med gasbussar på stadsgator tas inte i normalfallet vid samhällsplanering.

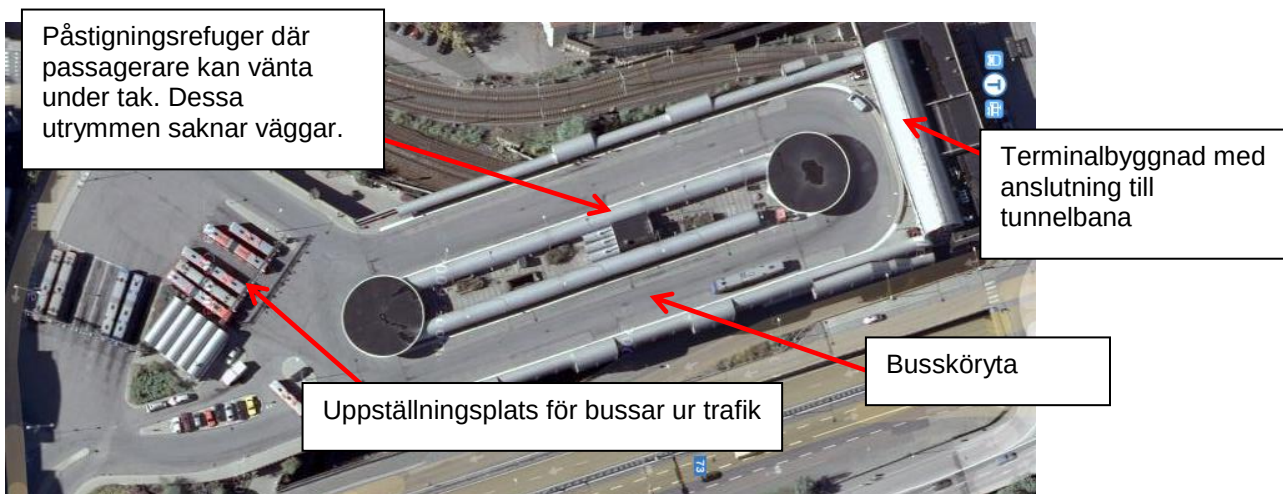
Som referensobjekt för en bussterminal ovan mark har en bussterminal likt Gullmarsplans bussterminal, se Figur 19, antagits. Detta innebär att bussterminalen har öppna körytor, uppställningsytor för bussar tagna ur trafik och en terminalbyggnad med anslutning till tunnelbanan. De delar som männi-

sker sannolikt vistas längst tid på är påstigningsrefugerna, som har ett tak som befinner sig relativt lågt i jämförelse med bussterminalens bergstak.



Figur 18. Samhällsrisik fordonsgas – under och över mark för brand- och explosionsscenarier.

För att bredda bilden ytterligare för hur bussterminalen, vid en förläggning i byggnad på ponton, kan en bussterminal inomhus ovan mark diskuteras. Systemhandlingen visar att redovisad risknivå för bussterminal avseende bussar som drivs med fordonsgas omfattar olycksrisker med potentiellt stora konsekvenser. Dessa konsekvenser bedöms inte bero på att anläggningen ligger under mark utan motsvarande olyckor kan inträffa i anläggningar ovan mark och även utomhus.



Figur 19. Gullmarsplans bussterminal som referensterminal ovan mark.

Med utgångspunkt i Figur 18 bedöms alltså risknivån för en bussterminal inomhus ovan mark befinna sig mellan den gröna och den blå kurvan. I en anläggning ovan mark torde förutsättningarna för ventilationstekniska åtgärder dock vara bättre än under mark eftersom ett utsläpp antingen kan självventileras bort eller kan lösas med kortare kanalisation genom tak och en väsentligt ökad fläktkapacitet.

7.3.1.3 Brand i vänthall

En brand i vänthallen inomhus eller i anslutning till väderskydd bedöms medföra en obetydlig risk och kunna hanteras av det befintliga brandskyddet.

7.3.2 Antagonistiska handlingar

Vad gäller risknivån för händelser förknippade med antagonism bedöms denna vara obetydlig för nollalternativet. Vissa riskreducerande åtgärder bör beaktas för att säkerställa ett grundläggande skydd, medan andra tekniska åtgärder och även administrativa och organisatoriska åtgärder bör förberedas för att införas om hotbilden ändras framöver.

7.3.3 Risker utanför bussterminal

För nollalternativet har även ett antal risker ovan mark identifierats.

7.3.3.1 Höga höjder och suicidrisker

För höga höjder och suicidrisker gäller samma som för nuläget, se avsnitt 7.1.3.1.

7.3.3.2 Olyckor på Stadsgårdsleden

I avsnittet presenteras riskuppskattningen för olyckor som bedöms kunna ske på Stadsgårdsleden.

7.3.3.2.1 Brand i fordon

En brand i ett fordon i nära anslutning till entrén till bussterminalen skulle sannolikt generera hög värmestrålning och påverka trafikflödet, för bilister, yrkestrafik och kollektivtrafiken, negativt. Att branden skulle sprida sig in i bussterminalen bedöms för både nuvarande placering och placering på ponton som mycket osannolikt, dock skulle möjligen en liten andel brandgaser kunna spridas in i terminalen, men merparten skulle spridas för vinden.

7.3.3.2.2 Utsläpp av flytande kemikalier

Ett utsläpp av brandfarlig vara från ett fordon eller från en fordonslast bedöms kunna spridas på Stadsgårdsleden. Befintligt dagvattensystem är utfört med dagvattenbrunnar med cirka 50 meters mellanrum. Kantsten gentemot omgivningen är bitvis låg och bedöms ha begränsad verkan på att kunna stoppa ett stort utsläpp av flytande kemikalier. Dagvattensystemet är inte utrett i detalj, men bedöms kunna omhänderta ett mindre utsläpp. Dock bedöms det som att ett stort utsläpp dessutom kommer kunna breda ut sig över t.ex. närliggande gång- och cykelbana innan dagvattensystemet har hunnit omhänderta det. I det fall bussterminalen befinner sig på ponton vid Stadsgårdsleden är avståndet längre och gång- och cykelbana och kaj samt eventuella barriärer såsom byggnader eller fordon befinner sig emellan.

7.3.3.2.3 Utsläpp av övrigt farligt gods

För riskbeskrivning, se avsnitt 7.2.5.4.3.

7.3.3.3 Olyckor på Katarinavägen

Utöver nollalternativets identifierade lokalisering av bussterminalen på Stadsgården respektive på ponton, kan även möjliga användning av Katarinavägen som bussgata diskuteras. Det kommer medföra högre persontäthet längs gatans trottoarer. Sannolikt kommer människor också korsa vägen där det inte finns övergångsställe, något som kan leda till trafikolycka. Statistik från olycksdatabasen Strada visar att övergångsstället mellan Södermalmstorg och Glashusen är olycksdrabbat; både lindriga och allvarliga olyckor med fotgängare och fordon har inträffat de senaste åtta åren. Risken för olycka bedöms därför som hög.

7.3.3.4 Olycka med gasformiga drivmedel

För placering av bussterminalen på Stadsgården samt förlagd på ponton bedöms risken obetydlig.

7.3.3.5 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Se beskrivning av risken i avsnitt 7.1.3.4. Risk för påverkan från södra stambanan bedöms finnas vid Stadsgården, tack vare långt avstånd från järnvägen.

7.3.3.6 LNG-hantering hos Viking Line

Viking Lines båt Grace drivs av flytande naturgas (Liquified Natural Gas, LNG). Hanteringen sker till sjöss från bunkerbåt som angör fartygets yttre sida och påbörjar bunkring. Ett gasutsläpp skulle upptäckas av personal som stoppar lossningen. Om antändning av utsläppet skulle ske bedöms det som att konsekvensen från explosionen kan nå bussterminalen om den är förlagd på ponton. Grace:s kajplats befinner sig över 1 kilometer från tilltänkta platsen för den temporära bussterminalen.

7.3.3.7 Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna

Bunkring av brännolja till kryssningsfartyg sker på fartygens sida mot vattnet. Bränslet är svårantändligt. Om antändning av utsläppet skulle ske bedöms det som att konsekvensen från den uppkomna branden kan nå bussterminalen om den är förlagd på ponton. Avgörande är hur nära fartyget pontonen kommer befinna sig.

7.3.3.8 Brand i busskoryta eller vid infart till bussterminal

För nuvarande bussterminal bedöms risken för brand i busskorytan eller i infarten som obetydlig tack vare den öppna konstruktionen. Vid en uppkommen brand i bussterminal på ponton bedöms risken också som obetydlig tack vare öppna konstruktionen.

7.3.3.9 Påseglingsrisker

Påsegling bedöms vara en risk endast då bussterminalen befinner sig på ponton. Påsegling av ett fartyg av viss storlek kan medföra olycksrisker inne i bussterminalen.

Tidigare analys (12) bedömer att en möjlig konflikt finns mellan den temporära bussterminalen på ponton på kajplats 152-153 och Birka Paradise:s dagliga anlöp till intilliggande kajplats 154-155. Risken bedöms då som den största under byggtiden och bör därför analyseras vidare.

Då pontonens och bussterminalens konstruktion inte är kända i dagsläget bedöms konsekvenserna som svårförutsägbara. Risken för påsegling bedöms dock som påtaglig.

7.3.3.10 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Passage över övergångsställen bedöms kunna utgöra en risk för fotgängare och cyklister på en så trafikintensiv plats som Slussenområdet. Risken för påkörningsolyckor i området bedöms dock överlag som att den kommer minska i takt med områdets utveckling. Närliggande detaljplan Slussen kommer bidra med planskilda stråk för fordon och fotgängare och detta gör att risken för nollalternativet bedöms som obetydlig.

7.3.3.11 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

Då bussterminal befinner sig på kaj eller ponton bedöms resenärer inte behöva korsa trafikerade övergångsställen i samma plan för att gå till eller från bussarna. När bussarna i ett senare skede av Slussenområdets ombyggnad förläggs i andra delar av staden förutsätts att busshållplatser utformas med hänsyn till omgivande trafik och att övergångsställen och gångstråk förläggs på säkra platser. Risken bedöms som obetydlig.

7.3.3.12 Stor olycka i Stadsgårdsledens tunnel

För bussterminalen på ponton bedöms risken som obetydlig. En olycka i Stadsgårdsledens tunnel bedöms kunna ge konsekvenser runt tunnelmynningen, men inte så pass långa så att de skulle nå till bussterminalen på ponton. Här har antagande gjorts att dagens restriktioner för farligt gods på Stadsgårdsleden behålls.

7.3.3.13 Ursparning av tunnelbanevagnar

Bussterminalen lokaliserad på kaj eller ponton bedöms riskpåverkan från tunnelbanevagnar vara obetydlig.

7.3.3.14 Havererande helikopter

Helikopter i taxiverksamhet kör ett antal gånger per vecka under året. Den bedöms endast utgöra en risk när bussterminalen befinner sig på ponton och inte för bussterminalen i dagsläget tack vare att bron skyddar bussterminalen. Risken för nedfallande helikopter bedöms dock som obetydlig.

7.3.4 Nollalternativet i temporärt skede eller nollalternativet i en förlängning

Som tidigare beskrivet kan bussterminalen i nollalternativet vara förlagd på olika platser. I ett första skede befinner sig på Stadsgårdens kaj eller på ponton och här har även fokus i riskbedömningen varit. I ett senare skede finns en möjlighet att bussarna kommer fortsätta trafikera Slussen genom att möjliggöra en permanent av- och påstigningsplats, men att bussarna sedan åker vidare och vänder på annan plats. Katarinavägen och Gamla stan har identifierats som sådana möjliga vändplatser.

En översiktlig beskrivning av det senare skedet görs därför. Risker förknippade med trafiksäkerheten för fotgängare, cyklister och bussresenärer bedöms som påtagliga, baserat på den olycksstatistik som studerats för området. Denna typ av olyckor kan ske på alla vägar och är därmed inte platsspecifik och bedöms därför som att den kan ske, oavsett var på- och avstigningsplatser förläggs.

Fordonsgasbussar medför en förhöjd risk, som tidigare beskrivet. Denna risk bedöms kunna uppkomma i det senare skedet för på- och avstigningsplatserna. Risknivån kan dock se olika ut beroende på utformningen av platsen. När bussarna sedan åker vidare för att vända på annan plats kommer de längs sin väg medföra viss riskpåverkan på omgivningen. Denna risk bör därför studeras vidare när exakt läge för av- och påstigningsplatser, samt vändplatser har fastlagts.

8 Riskvärdering

I detta kapitel värderas de analyserade riskerna kvantitativt eller kvalitativt mot acceptanskriterier, där de finns att tillgå.

8.1 Riskvärdering för nuläget

8.1.1 Risker i bussterminal

8.1.1.1 Trafikolycka

En kollision i låg hastighet bedöms inte leda till att människor kläms fast, utan de kan ta sig ur bussen på egen hand. Påkörning av resenär eller busschaufför bedöms dock kunna leda till personskador och potentiellt allvarliga sådana. Bussterminalens närhet till anslutande vägar och öppna utformning bedöms bidra till att omhändertagande av skadade kan ske utan svårighet.

8.1.1.2 Brand i buss

En brand i buss bedöms medföra en hög effekt- och rökutveckling. Möjligheten till att utrymma bort från olycksplatsen bedöms som god, då nulägets bussterminal är öppen åt flera håll. En brand i buss bedöms även observeras av personal på plats som kan inleda en släckinsats med befintliga brandskyddsåtgärder.

8.1.1.3 Brand i vänthall

En brand i nulägets bussterminal bedöms kunna handla om en brand i papperskorg eller liknande mindre brandscenario. Möjligheten till att utrymma finns genom att bege sig ut eller vidare via tunnelbanan ut. Här måste dock beaktas att om utrymning sker till busskörytor uppkommer en annan risk; påkörning av passerande bussar.

8.1.2 Antagonistisk handling

På befintlig plats för bussterminalen finns övervakningskameror i resenärsutrymmen samt ronderande väktare. Inga särskilda skyddsåtgärder har identifierats för antagonistiska handlingar.

Generellt förespråkas fördjupad analys för att avgöra behov av utformning av riskreducerande åtgärder inklusive kontroll av det befintliga brandskyddet.

8.1.3 Risker utanför bussterminal

8.1.3.1 Höga höjder och suicidrisker

Gällande höga höjder och suicidrisker i det offentliga rummet bedöms det inte nödvändigt eller effektivt att hantera dessa med åtgärder inom ramen för planprocessen. Enbart en begränsad del av den olycksdrabbade vägsträckan förväntas ingå i planområdet. Därför bedöms inte fysiska åtgärder såsom staket eller högre mur vara effektiva. Eventuella riskreducerande åtgärder för den aktuella platsen bör även inbegripa psykosociala aspekter och åtgärder. Vid behov av fysiska åtgärder såsom staket bedöms detta vara möjligt att uppföra utan specifikation av skyddsåtgärder i detaljplan.

Olika typer av åtgärder för att hantera denna risk utvärderas fortlöpande av Riksförbundet för Suicid-Prevention och Efterlevandes Stöd (SPES) i Stockholm, som samverkar med blåljusmyndigheter, Trafikverket, SL och kommuner. De har i uppdrag att kartlägga platser med risk, följa upp frågor som rör suicidprevention i samhället samt att regelbundet utbyta information kring denna fråga.

8.1.3.2 Olycka med gasformiga drivmedel

För nulägets placering av bussterminalen bedöms en olycka med gasformiga drivmedel kunna leda till ett stort antal skadade till följd av explosion. Andelen gasbussar bedöms bli fler och fler i förhållande till andelen dieseldrivna bussar.

8.1.3.3 Transport av farligt gods på Stadsgårdsleden

Olyckor på Stadsgårdsleden bedöms få obetydlig påverkan på nuläget. Det styckegods av farligt gods som är tillåtet att transportera på Stadsgårdsleden bedöms inte vara av sådan karaktär att det får ett stort påverkansområde. Transporterna sker i enlighet med krav i lagstiftningen för transport av farligt gods samt Länsstyrelsens lokala trafikföreskrifter om transportvägar för farligt gods.

8.1.3.4 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Risken för en olycka med transporter av farligt gods på södra stambanan har uppskattats till obetydlig. Transporterna sker i enlighet med krav i lagstiftningen för transport av farligt gods.

8.1.3.5 LNG-hantering hos Viking Line

Risken bedöms som obetydlig tack vare långt avstånd till nulägets bussterminal. Hanteringen av LNG sker i enlighet med både lagstiftningen om transport av farligt gods och den om brandfarliga gaser.

8.1.3.6 Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna

Risken bedöms som obetydlig tack vare relativt långt avstånd samt hantering av svårantändlig vätska. Det faktum att kryssningsfartyget och även terminalbyggnaden befinner sig mellan lossningspunkten och bussterminalen för nuläget, gör att risken värderas som acceptabel.

8.1.3.7 Drivmedelsstation OK/Q8 på Katarinavägen

Risken för utsläpp kopplat till hantering av drivmedel i anslutning till drivmedelsstation bedöms som påtaglig. Vid lossning från tankbil finns mycket detaljerade föreskrifter hur detta ska ske. Utrymningsmöjligheter bort från platsen bedöms som goda och utrustning för brandbekämpande åtgärder finns på plats.

8.1.3.8 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Statistik har visat att olyckor sker för nuläget. Identifierade platser är t.ex. övergångsstället över Katarinavägen vid Södermalmstorg och på Stadsgårdsleden, där bussterminalen befinner sig. Dessa platser är reglerade med trafiksignaler. Risken bedöms som oacceptabel för fotgängare och cyklister.

8.1.3.9 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

Trafiksäkerheten för bussresenärer bedöms som oacceptabel i och med att människor måste korsa trafikerade bussfiler där trafiksignaler, bommar eller annan typ av trafikreglering saknas.

8.1.3.10 Ursparning av tunnelbanevagnar

Risken för ursparning av tunnelbanevagnar bedöms som obetydlig. Risken kan värderas mot de regelverk som finns för järnvägar och där bedöms tillfredsställande skyddsåtgärder har vidtagits för att förhindra att tunnelbanetåg faller ned på bussterminalen. Risken bedöms vara acceptabel.

8.2 Riskvärdering för huvudalternativet

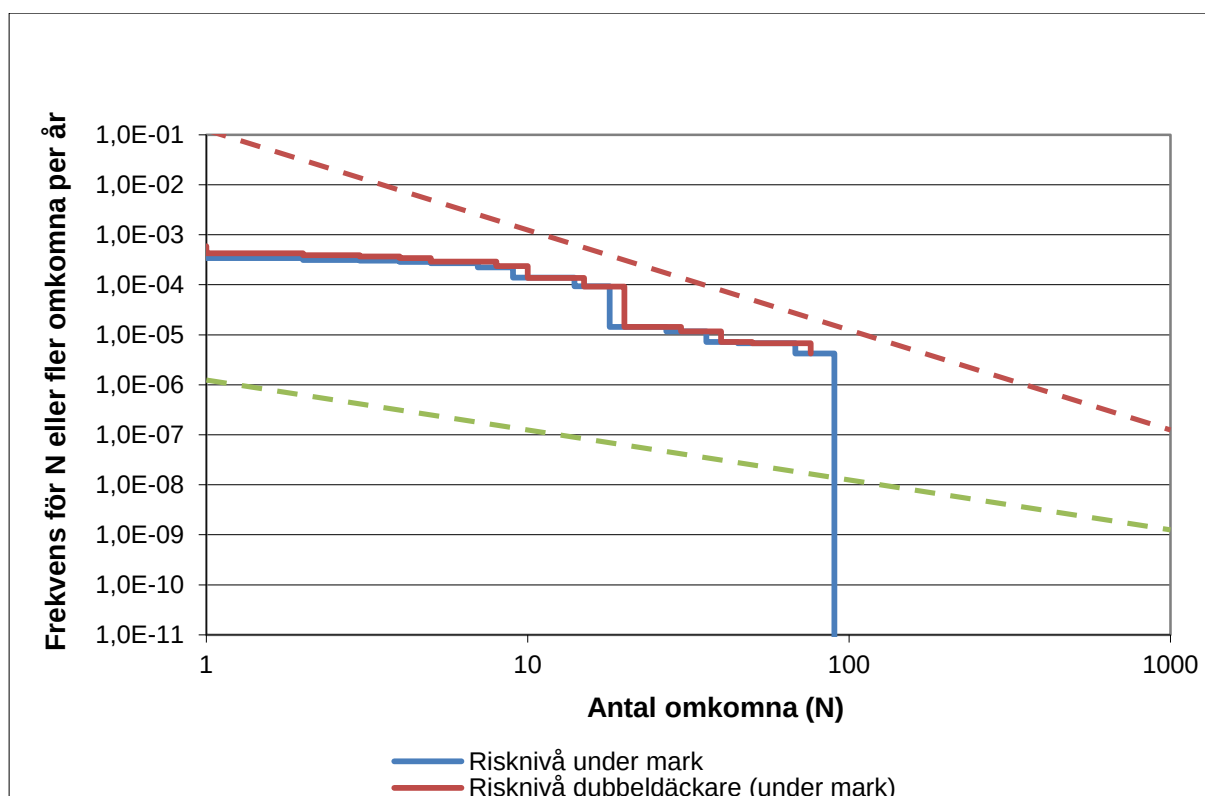
8.2.1 Risker i bussterminal

8.2.1.1 Trafikolycka

En kollision mellan bussar bedöms leda till materiella skador; en kollision i låg hastighet bedöms inte leda till att människor kläms fast, utan de kan ta sig ur bussen på egen hand. Personskador bedöms kunna uppkomma främst hos busschaufförer som korsar busskörytan på väg mellan reglerplatser och vänthall. Utformning med närliggande pausutrymme för chaufförer bedöms minska sannolikheten för påkörning.

8.2.1.2 Brandrisker

De analyserade brandscenerierna har uppskattats kvantitativt. Den risk som har bedömts ha störst riskpåverkan i bussterminalen är fordonsgasen. Risknivån här är hög och mycket liten skillnad finns mellan en normalbuss och en dubbeldäckare under mark. De analyserade scenarierna befinner sig inom det föreslagna samhällsriskkriteriets ALARP-område. Det innebär att det bör genomföras riskreducerande åtgärder för att i möjligaste mån sänka risken mot den undre gränsen (grönstreckad).



Figur 20. Samhällsrisik för scenarier med fordonsgas i bussterminal för normalbuss och dubbeldäckare, samt acceptanskriterier. Säkerhetsmålet (acceptanskriterierna) illustreras med streckade linjer.

En förklaring till att risknivån ligger högt inom det område där åtgärder skall vidtas så långt som är praktiskt och ekonomiskt möjligt är till följd av ett antal mycket konservativa antaganden. Anledningen till detta är att dessa styrs av åtgärder och riskfaktorer som inte bedömts vara möjliga att kravställa eller styra i detaljplanen. Motivet till att göra så är att säkerställa att planen är genomförbar även under ogynnsamma förutsättningar när det gäller dessa åtgärder. Exempel på sådana antaganden kring riskfaktorer är:

- Låga serviceintervall och underhåll av smältsäkringar.
- Konsekvensens storlek för explosionsscenarier.
- Andelen bussar som drivs med fordonsgas.

Driftsorganisationen har möjlighet att arbeta vidare med åtgärder för att påverka vissa av dessa riskfaktorer och på andra vis verka för att risknivån sänks genom åtgärder som anges i riskutredningen, t.ex.:

- Krav på fordonsflottan, både avseende teknisk utformning och service.
- Utbildning av chaufförer.
- Begränsning av andelen bussar som drivs med fordonsgas.

För risker som hamnar inom ALARP-området måste alla ekonomiskt och praktiskt rimliga åtgärder vidtas. Syftet med åtgärderna är att minska risknivån antingen genom att minska sannolikheten (eller frekvensen) för en händelse, konsekvenserna av densamma eller att både och, se vidare i det projektspecifika säkerhetsmålet (20). I samband med riskvärderingen har det inte bedömts vara praktiskt eller ekonomiskt möjligt att ställa krav på ovanstående åtgärder i planskedet, utan dessa åligger verksamhetsutövaren att genomföra och lämnas därmed som rekommendation till driftsorganisationen. Det kommer då också vara möjligt för driftsorganisationen att uppdatera riskanalysen och påvisa att risk-

nivån sänkts genom dessa åtgärder och/eller genom att styra ovan angivna riskfaktorer. På samma vis kommer det att vara möjligt för projekteringsorganisationen att utvärdera effekten av detaljprojekteringen av säkerhetskonceptet genom uppdatering av riskanalysen.

Under projekteringen, som är en iterativ process, har succesivt ett stort antal åtgärder utretts och utvärderats. Flertalet av dessa återfinns i säkerhetskonceptet (7), men vissa har avfärdats eftersom säkerhetskonceptet ofrånkomligt är en avvägning mellan många väsentliga intressen. Exempel på åtgärder som under projekteringen bedömts vara praktiskt eller ekonomiskt orimliga t.ex. när de kommer i stark konflikt med andra målsättningar med anläggningen är: annan layout av bussterminalen, t.ex. brandsektionering vid hållplatserna, flamdetektorer och gassläcksystem, överkapacitet avseende utrymning- och insatsvägar, öka fläktkapacitet för att de luftväxling på över 20-30 gånger per timme samt att skapa ytterligare ventilationsöppningar till anläggningen. Flera av dessa åtgärder kommer i stark konflikt med t.ex. arkitektoniska värden, kulturvärden, personsäkerhet, trygghet och kostnadsramar för projektet.

Sammanfattningsvis bedöms det föreslagna kriteriet ligga i samma storleksordning som övriga europeiska vägtunnlar, t.ex. Holland, Italien och Danmark. Medelrisken är samtidigt högre än vissa kriterier som tillämpas inom kemisk industri och exploateringar utmed transportleder för farligt gods.

Medelrisken för bussterminalen redovisades i avsnitt 7.2.3.1 och innebär ett förväntat antal omkomna på $4,5 \times 10^{-3}$ per år. Ställt mot kriteriet för medelrisk, $3,3 \times 10^{-2}$ omkomna per år, innebär detta att medelrisken för bussterminalen är under det satta acceptanskriteriet och därmed acceptabel.

Individriska för bussterminalen som beskrivits i avsnitt 7.2.3.3 är $2,05 \times 10^{-7}$, det vill säga sannolikheten att omkomma per år vid pendling. Detta kan nu ställas mot kriteriet för individriska i säkerhetsmålet, som är $2,2 \times 10^{-6}$, se avsnitt 2.5.3.2. Resultatet visar att individriska för bussterminalen är under det satta acceptanskriteriet och därmed acceptabel.

De brandrisker som kvalitativt diskuterades för bussterminalen bedöms kunna påverka människor. Denna restrisk har inte kvantifierats men bedöms vara obetydlig mot bakgrund av den projekterade brandskyddsnivån och olycksstatistik från liknande verksamheter, exempelvis parkeringsgarage, tunnlar och undermarksanläggningar.

Den kumulativa risk som identifierats är brandspridning mellan galleria och bussterminal. I systemhandlingen redovisas ingående hur brandskydd enligt kraven i BBR mellan de olika anläggningsdelarna kommer säkerställa att brand inte kan spridas. Risker för brandspridningen bedöms därmed som acceptabel.

8.2.2 Antagonistisk handling

Identifierade åtgärder är i detta skede främst av förebyggande karaktär då det ej i enlighet med rimlighetsprincipen bedöms gå att dimensionera planområdet för eventuella terrordåd.

Antagonistiska handlingar har beaktats i systemhandlingen och detaljer om utformning gällande flödes hastighet, utspädning, detektion i kanalisation och liknande kommer ske i kommande ventilationsprojektering. Att förlägga luftintag vid markytan är känsligt, men inte ovanligt. Projektet är medvetet om att det finns risker förknippade med antagonistiska hot, vilka fortlöpande måste ses över.

Anlagd brand är en vanligt förekommande antagonistisk handling. Ofta är anlagda bränder små, men även större anlagda bränder har beaktats vid utformningen av brandskyddet i anläggningen. I projekteringen av bussterminalen har vissa åtgärder tagits mot antagonistiska hot, till exempel har explosionslast beaktats vid dimensionering av bärande konstruktioner och utformning av ventilationssystemet. Det finns en antagonistisk hotbild vilken är svårbestämd men inte kan sägas vara försumbar.

Trots detta föreligger alltid en restrisk för ett stort antal skadade och omkomna vid sabotage och terrorangrepp såsom sprängningar, utsläpp av giftig gas eller liknande. Dessa går inte att helt och hållet att bygga bort. Att försöka kvantifiera sannolikhet och konsekvens för dessa händelser bedöms inte vara möjligt. Vid en förändrad hotbild bedöms dessa risker i första hand hanteras genom organisatoriska och polisiära åtgärder.

8.2.3 Risker utanför bussterminal

Följande risker har värderats kvalitativt:

8.2.3.1 Höga höjder och suicidrisker

För höga höjder och suicidrisker gäller samma som för nuläget, se avsnitt 8.1.3.1. Suicidriskerna bedöms inte vara alternativskiljande.

8.2.3.2 Mynningar av utrymningsvägar vid Entré Lokatten och från in- och utfartstunnel

De två utrymningsvägarnas mynningar är under fortsatt utredning och detaljprojektering pågår.

8.2.3.3 Olyckor på Stadsgårdsleden

Olyckor på Stadsgårdsleden bedöms få obetydlig påverkan på huvudalternativet. Det styckegods av farligt gods som är tillåtet att transportera på Stadsgårdsleden bedöms inte vara av sådan karaktär att det får ett stort påverkansområde. Risker värderas som acceptabel.

8.2.3.4 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Givet det långa avståndet och att bussterminalen befinner sig under mark görs värderingen att risken är acceptabel.

8.2.3.5 LNG-hantering hos Viking Line

Bedöms på samma sätt som i avsnitt 8.1.3.5.

8.2.3.6 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Risken värderas som acceptabel eftersom flertal planskilda övergångar kommer skapas.

8.2.3.7 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

Risken värderas som acceptabel eftersom dels planskilda ytor kommer finnas för trafik respektive fotgängare och dels för att byte mellan trafikslag sker inomhus utan att behöva korsa trafikerade vägar.

8.3 Riskvärdering för nollalternativet

I detta avsnitt presenteras riskvärderingen för nollalternativet.

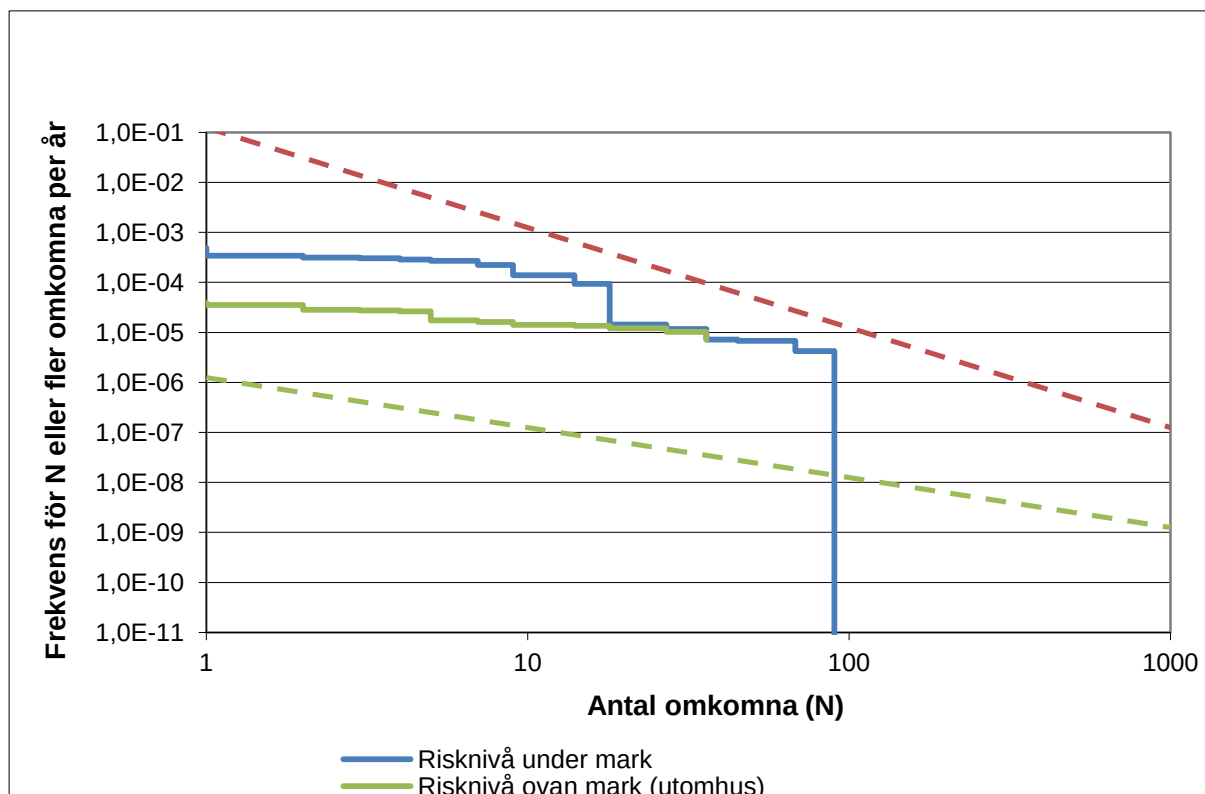
8.3.1 Risker i bussterminal

8.3.1.1 Trafikolycka

En kollision i låg hastighet bedöms inte leda till att människor kläms fast, utan de kan ta sig ur bussen på egen hand. Påkörning av resenär eller busschaufför bedöms dock kunna leda till personskador. Bussterminalens närhet till anslutande vägar och sannolikt öppna utformning bedöms bidra till att omhändertagande av skadade kan ske utan svårighet.

8.3.1.2 Brand i bussterminal ovan mark

Brandrisken med fordonsgas i bussterminal har uppskattats kvantitativt och värderas mot de satta acceptanskriterierna i Figur 21. Risken befinner sig inom ALARP-området, vilket innebär att den är acceptabel, men att riskreducerande åtgärder bör vidtas för att sänka risknivån i den det är praktiskt och ekonomiskt möjligt.



Figur 21. Samhällsrisik för bussterminal ovan och under mark värderat mot acceptanskriterierna. Säkerhetsmålet (acceptanskriterierna) illustreras med streckade linjer.

8.3.1.3 Brand i vänthall

Vid en förläggning av bussterminalen på kaj eller ponton kommer den brandtekniska projekteringen hantera frågor om brandskydd mellan delar i anläggningen och tillse att lagstiftningens krav uppfylls. Risken värderas därför till acceptabel för en brand i vänthall.

8.3.2 Antagonistisk handling

För värdering av antagonistiska handlingar hänvisas till avsnitt 8.2.2, då dessa bedöms kunna inträffa även för nollalternativet, med undantag för ventilationsfrågan eftersom bussterminalen i nollalternativet, inräknat uppställningsplats för bussar och busskörtyr, förväntas ha en förhållandevis öppen konstruktion.

8.3.3 Risker utanför bussterminal

8.3.3.1 Höga höjder och suicidrisker

För höga höjder och suicidrisker gäller samma som för nuläget, se avsnitt 8.1.3.1.

8.3.3.2 Olyckor på Stadsgårdsleden

Det styckegods av farligt gods som är tillåtet att transportera på Stadsgårdsleden bedöms inte vara av sådan karaktär att det får ett stort påverkansområde. För att risken inte ska öka bedöms det som rimligt att dagens förbud mot tankbilar och tankcontainers behålls på sträckan, om inte andra riskreducerande åtgärder kan ge motsvarande skyddsnivå. Risken värderas då som acceptabel.

8.3.3.3 Transporter av farligt gods på södra stambanan

Risken värderas som acceptabel för bussterminalen på ponton, tack vare långt avstånd från järnvägen.

8.3.3.4 LNG-hantering hos Viking Line

Risken bedöms som acceptabel men samtidigt rekommenderas vidare utredning beroende på pontonens läge i förhållande till platsen för LNG-hantering. En sådan utredning kan då ge svar på vilket skyddsavstånd och vilka åtgärder som måste vidtas för att en acceptabel risknivå för bussterminalen ska uppnås.

8.3.3.5 Drivmedelsolycka vid bunkring hos rederierna

Risken värderas till acceptabel givet hur svårantändligt bränslet är. Vidare utredning kan dock ge svar på mer precist skyddsavstånd och de åtgärder som bör vidtas för att en acceptabel risknivå för bussterminalen ska uppnås.

8.3.3.6 Brand i busskoryta eller vid infart till bussterminal

Risken värderas som acceptabel baserat på ett antagande om att den brandtekniska projekteringen kommer analysera dessa frågor och tillse att utformningen uppfyller lagstiftningens krav. Bussterminalen på pontonen har antagits ha en öppen konstruktion och skulle då få motsvarande risknivå som andra öppna bussterminaler, som diskuterades i avsnitt 7.3.1.1.

8.3.3.7 Påseglingsrisker

Påsegling bedöms vara en risk då bussterminalen befinner sig på ponton. Slutsatsen av riskbedömningen är att risknivån för påsegling kommer att reduceras i och med den nya utformningen av sluss och avtappningskanaler och ny reglering av Mälaren. Samtidigt möjliggörs större tappningar vilket i sin tur måste värderas om de medför konsekvenser för sjöfarten och hur detta kan påverka förläggningen av bussterminalen på ponton.

8.3.3.8 Trafiksäkerhet för fotgängare och cyklister

Påkörningsolyckor har varit relativt vanligt förekommande runt övergångsställe vid Södermalmstorg samt på Stadsgårdsleden, men närliggande detaljplan Slussen kommer bidra med planskilda stråk för fordon och fotgängare och detta gör att risken för nollalternativet bedöms som obetydlig och värderas som acceptabel.

8.3.3.9 Trafiksäkerhet för bussresenärer på väg till eller från buss

Påkörningsolyckor har varit relativt vanligt förekommande på övergångsställen mellan refugerna i befintliga bussterminalen, men närliggande detaljplan Slussen kommer bidra med planskilda stråk för bussar och bussresenärer när terminalen är förlagd på kaj eller ponton och detta gör att risken för nollalternativet bedöms som obetydlig och värderas som acceptabel.

8.3.3.10 Stor olycka i Stadsgårdsledens tunnel

En stor olycka i tunneln har uppskattats till obetydlig. Påverkan bedöms som sannolik utanför tunneln, men risken värderas som acceptabel då antagande görs att tunneln projekteras med de skyddsåtgärder som anses nödvändiga för att uppnå en hög säkerhetsnivå.

8.3.3.11 Ursparning av tunnelbanevagnar

Risken påverkan har uppskattats till obetydlig. Givet det långa avståndet från tunnelbanans mynning till Stadsgårdsledens kaj eller till ponton värderas risken som acceptabel.

8.3.3.12 Havererande helikopter

Risken värderas som acceptabel givet de förutsättningar som finns fastlagda för verksamheten. Om bussarna i en förlängning kommer trafikera delar av Gamla stan för att vända, se kapitel 5, bör risknivån dock utredas vidare eftersom detta kan medföra att bussverksamheten förflyttas mot helikopterplattan och därmed kan en förändring av risknivån ske.

9 Övergripande samlad värdering av alternativen

Den föreslagna markens lämplighet har bedömts utifrån risk- och säkerhetssynpunkt enligt PBL kap 1 §§ 4 och 5 samt PBL kap 2, 6§. Som komplement till riskvärderingen presenteras nedan en kortfattad kvalitativ generell riskvärdering för nuläge, huvudalternativ och nollalternativet som helhet. För samtliga nedanstående alternativ bedöms risken med höga höjder och suicidrisker som påtaglig och likvärdig. Utöver detta finns en mängd risker som efter hantering bedöms vara små och acceptabla. I värderingen nedan lyfts de större riskbidragen för respektive alternativ.

9.1.1 Nuläget

Riskenivån för olycka med fordonsgas värderas som en måttlig risk. En tryckuppbyggnad från en explosion begränsas av nuvarande bussterminalens öppna sidor. Dock bedöms ett stort antal skadade kunna uppkomma till följd av kärlsprängning, jetflamma eller fördröjd antändning av gasmoln. Antagonistiska hot har värderats som en obetydlig risk för befintlig bussterminal. Terminalens relativt öppna utformning bedöms som gynnsam sett utifrån konsekvenser av explosion.

För nuläget bedöms risk även uppkomma på grund av drivmedelsstation OK/Q8. Utifrån drivmedelsstationens utformning, närhet till omgivande bebyggelse, upprättade klassningsplaner, och de volymer som transporteras till stationen är bedömningen att det främst är scenarier förknippade med transporter och lossning (från lastbil till cistern) som bedöms generera en påtaglig riskenivå. Risk bedöms uppkomma både vid drivmedelsstationen och längs transportvägen. Risknivåerna för nuläget bedöms som betydande till följd av olyckor orsakade av nedfallande delar, byggnadsras eller kollaps. Dessa kan få mycket allvarliga konsekvenser.

9.1.2 Huvudalternativet

Trafikeringen med fordonsgasdrivna bussar i bussterminalen under mark medför en påtaglig riskenivå, men den befinner sig inom de föreslagna acceptanskriterierna förutsatt att föreslaget säkerhetskoncept (7) realiseras. Det finns en antagonistisk hotbild vilken är svårbestämd men inte kan sägas vara försumbar. Undermarksanläggningen har överlag bedömts som mer sårbar än en icke innesluten anläggning och riskreducerande åtgärder, bland annat för ventilationssystemet, är under utredning.

Flertal åtgärder, såsom kameraövervakning, bedöms komma genomföras för att minska sannolikheten för ett attentat men även sannolikheten för att de ska uppstå. Ett fullständigt skydd mot angrepp på anläggningen bedöms dock inte vara möjligt. Anlagd brand bedöms vara en vanligt förekommande antagonistisk handling i en undermarksanläggning. Både små och stora anlagda bränder har beaktats vid utformningen av brandskyddet i anläggningen. Risken för antagonistiska hot kan således sägas vara delvis hanterad genom en kombination av fysiska och organisatoriska åtgärder. En kvarstående hotbild finns dock och de potentiella konsekvenserna bedöms kunna bli mycket stora. Risken bedöms emellertid som acceptabel.

9.1.3 Nollalternativet

En olycka med gasformiga drivmedel kan för bussterminalen, oavsett dess läge, få stora konsekvenser på omgivningen. Figur 18 visar att riskenivån är påtaglig, men inom de föreslagna acceptanskriterierna, även när bussterminalen är placerad ovan mark. Vid placering på ponton bedöms bebyggelse befinna sig på längre avstånd från bussterminalen än vid placering i andra delar av staden. Särskild hänsyn till trafikering med gasbussar på stadsgator tas inte i normalfallet vid samhällsplanering. Antagonistiska hot är svåra att både definiera och värdera för nollalternativet. Risken värderas som acceptabel givet att riskreducerande åtgärder genomförs.

10 Jämförelse mellan alternativen

Suicidrisker bedöms inte vara alternativskiljande. Inom ramen för detaljplanen finns Katarinaberget som utgör en hög höjd och som kommer finnas kvar oavsett var bussterminalen förläggs.

Utifrån huvudalternativets layout och önskade funktion för bussterminalen kommer risknivån vid händelse av brand att öka jämfört med nuläget. Ett omfattande säkerhetskoncept finns framtaget för att eliminera och/eller reducera dessa risker. De åtgärdsförslag som nu finns i projekteringen visar på en hög skyddsnivå i bussterminalen, där både tekniska och organisatoriska åtgärder bedöms erforderliga. Trots detta går det inte helt att utesluta att en omfattande brand eller olycka med fordonsgas, i kombination med att ett eller flera säkerhetssystem inte fungerar, medför stora konsekvenser på människor i bussterminalen i huvudalternativet. Detta bedöms sakna motsvarighet i nuläge och nollalternativ.

Risken för antagonistiska hot bedöms som lägre för nuläget och för nollalternativet än för huvudalternativet eftersom inneslutning av bussterminalen saknas. Inneslutningen i sig har identifierats som en konsekvenshöjande faktor.

Drivmedelsstationen förutsätts avvecklas inom en snar framtid och det medför att riskkällan försvinner, något som har en gynnsam effekt för samtliga studerade alternativ.

En olyckstyp som bedöms kommer att minska vid ett genomförande av huvudalternativet är trafikolyckor med fotgängare, cyklister och bussresenärer. Dessa trafikantgrupper kommer då få mindre kontakt med vägtrafiken och ökade möjligheter till planskilda övergångar mellan olika platser och olika kommunikationsmedel. Huvudalternativet ställt mot nollalternativet bedöms här som att huvudalternativet har en lägre sammantagen risknivå. För nuläget finns en betydande risk inom trafiksäkerhetsområdet.

11 Riskreducerande åtgärder

Riskreducerande åtgärder kan antingen vara sannolikhetsreducerande eller konsekvensbegränsande. I projekteringen av bussterminalen i Katarinaberget har ett antal riskreducerande åtgärder projekterats för att säkerställa en hög skyddsnivå, se vidare i säkerhetskonceptet (7).

Busskörytor samt in- och utfartstunnel har försetts med följande tekniska lösningar:

- Egen brandcell.
- Utrymningsvägar enligt utrymningsstrategin.
- Utrymningslarm.
- Nödbelysning.
- Vattensprinkler i bussköryta samt in- och utfartstunnel utformas så att brand begränsas till en buss vilket utgör dimensionerande brand. För att minimera risken för brandspridning mellan bussar krävs kylning av angränsande bussar.
- Brandgaser från busskörytan ventileras ut genom samma kanalisation som allmänventilationen. Brandgasventilationen i in- och utfartstunneln bygger på att brandgas genom reversering av allmänventilationen ska tryckas ut från busskörytan samt in- och utfartstunneln till in- och utfartstunnelns mynning.
- Branddetektionssystem med påföljande larm.
- Gasdetektionssystem med påföljande larm.
- Bussterminalens tekniska system i taknivå, såsom armaturer, bör utföras i EX-utförande, dvs. de är anpassade för att kunna monteras i miljöer där antändningsbara gas-luft-blandningar finns, utan att själva utgöra en tändkälla.
- System för trafikstyrning.
- Övervakningskamera, CCTV (closed-circuit television).

Anläggningens säkerhets- och skyddsåtgärder bygger på att händelser i busskörytan inte medför riskpåverkan på personer i vänthallen. I övrigt finns ett antal tekniska lösningar för att hantera brand i vänthall:

- Egen brandcell.
- Utrymningslarm.
- Nödbelysning.
- Till- och frånluft för vänthall utformas avskilda i egna brandceller.
- Skyddsmål för brandgasventilationen inom vänthallen är primärt att säkerställa att utrymmande personer ej utsätts för kritiska förhållanden samt att möjliggöra för räddningstjänsten att genomföra insats.
- Automatisk vattensprinkleranläggning.
- Utrymningshissar från vänthall har som syfte är att säkerhetsställa trygg utrymning från vänt-hallsplan för personer med funktionsnedsättning.

Antagonistiska hot:

- Föreslagna skyddsåtgärder gällande antagonistiska hot sammanfaller till viss del med åtgärder för att säkerställa ett väl fungerande brandskydd, se utdrag ur säkerhetskonceptet ovan, t ex hantering av anlagd brand. Ytterligare ett exempel är de utrymningsvägar som projekterats för bussterminalen vilka blir betydelsefulla för utrymning av annat skäl än brand.
- Någon typ av detektion i ventilationssystemet är planerad, men det är i dagsläget oklart vilken typ. Dessa frågor är under utredning i projektet.
- Övervakningskamera i form av CCTV (closed-circuit television) kommer finnas i busskörytor, men kommer med stor sannolikhet att användas i merparten av bussterminalen.
- Uppsikt samt ordning kring fasader utanför bussterminalen bör vara god. God belysning samt en inte alltför hög eller buskig växtlighet kring fasaderna är att önska för att minska möjligheterna för en person att kunna verka ostört.
- Utöver dessa åtgärder bör åtgärder förknippade med övervakning, tillträdesskydd, tillträdesbegränsning, låsta utrymmen och organisatoriska aspekter beaktas. Kameraövervakning och närvaro av väktare är exempel på åtgärder vilka minskar risken för antagonistiska hot och också ökar den upplevda tryggheten för resenärerna. Det bedöms det därför som lämpligt att ytterligare undersöka utrymning av stora folkmassor bort från anläggningen/området när de utrymmande har kommit ut ur utrymningsvägen. Så kallad crowd management, dvs. att på ett medvetet och kontrollerat sätt styra utrymmande, kan vara en möjlig åtgärd.

För maritima risker kopplade till den temporära bussterminalen på ponton föreslås följande riskreducerande åtgärder baserat på tidigare utredning (12):

- Kollision mellan pråm och temporär bussterminal.
Inrätta en avgränsad zon ca 3m från kanten på pontonen, där människor inte vistas, för att minska konsekvensen.
- Kollision mellan Birka Paradise och temporär bussterminal.
Inrätta en buffertzona mellan pontonens östra kant och stäven på Birka Paradise, för att minska risken. Flytta bussterminalen så långt väster ut som möjligt för att åstadkomma större buffertzona. Se till att det finns utrymningsvägar från bussterminalen så att den kan utrymmas snabbt vid olycka. Överväg en skyddsponton eller liknande mellan bussterminalen och Birka Paradise, om inte tillräcklig buffertzona kan åstadkommas. En temporär bussterminal på en ponton bör vara föremål för en särskild riskbedömning beroende på konstruktion och utförande.
- Allvarlig pontonolycka som berör den temporära bussterminalen.
Tillse att det finns utrymningsvägar från bussterminalen så att den kan utrymmas snabbt.

12 Osäkerheter

Detta avsnitt omfattar en diskussion med identifiering och hantering av de osäkerheter som är förknippade med den riskbedömning som gjorts.

12.1 Identifiering av osäkerheter

Riskbedömning är alltid förknippad med osäkerheter, om än i olika omfattning. Osäkerheterna i denna riskbedömning beror bland annat på:

- Viktiga strategiska beslut, rörande exempelvis framtida kollektivtrafiksatsningar, är under diskussion, men ej beslutade. Detta gör det svårt att i detalj studera riskkällor förknippat med alternativa drivmedel.
- För många av olyckshändelserna och riskkällorna som analyserats råder osäkerheter rörande tänkbara konsekvenser, t ex antagonistiska hot.
- Upprättade delanalyser och tillhörande underlagsmaterial kan ha olika syfte, något som kan innebära att de är framtagna ur olika lagstiftningskrav.
- Varierande riskanalysmetodik har nyttjats i delanalyserna och detta kan göra jämförelser mellan de olika riskerna svårt.

12.2 Hantering av osäkerheter

Genomförda delanalyser har upprättats med samma övergripande syfte och mål; att utgöra ett beslutsunderlag för bedömning av markens lämplighet inom projekt Slussen Berg. Med hänsyn till de vitt skilda karaktärerna hos olyckshändelserna och riskkällorna kan delanalyserna varit gjorda utifrån skilda lagstiftningar och dels under arbetets gång kan det ha varit svårt att ha ett likriktat arbetssätt för alla delanalyserna. Olika riskanalysmetoder har använts och det har varit en stor variation i tillgängligt underlagsmaterial. Detta gör det svårt att på ett korrekt sätt ”addera” risknivåerna för de olyckshändelser som kan förväntas uppstå med hänsyn till föreslaget planförslag och få en kvantifierbar förändring av risknivån.

Det finns inga fastställda acceptanskriterier rörande risknivå i Sverige. Detta medför att det i två olika riskbedömningar kan skilja mellan valda acceptanskriterier vilket medför olika inställningar till när riskreducerande åtgärder krävs/rekommenderas/kan genomföras. I denna riskbedömning har som tidigare beskrivits, olika acceptanskriterier använts, både tidigare använda och vedertagna samt framtagna specifikt för detta projekt. Detta kan tyckas skapa en osäkerhet i bedömningsgrund, men ger samtidigt möjlighet att ta hänsyn till mycket specifika risker som annars, med mer allmängiltiga och sektorsövergripande acceptanskriterier, skulle kunna undervärdera eller övervärdera en risk. De acceptanskriterier som tagits fram i projektet är underbyggda med nationell och internationell statistik samt har rimlighetsvärderats och visar där att säkerhetsmålets risknivå är lägre eller i samma storleksordning som för många andra motsvarande risker i samhället, t.ex. i andra transportsystem.

För många av olyckshändelserna som analyserats råder osäkerheter rörande tänkbara effekter. Trots att ett grundligt riskinventeringsarbete genomförts kan det förekomma potentiella olyckshändelser som ej identifierats som kritiska i dagsläget, men som med hänsyn till framtida samhällsförändringar kan visa sig generera icke acceptabla risknivåer. Detta är ett problem som är svårt att hantera och för att lyckas med det, har många av de olyckshändelser som avskrivits i den inledande riskinventeringen och översiktliga bedömningen värderats och reducerats genom de åtgärdsförslag som presenterats för de olyckshändelser och riskkällor som bedöms generera högre risknivåer. De åtgärdsförslag som nu finns i projekteringen visar på en mycket hög skyddsnivå i bussterminalen, där både tekniska och organisatoriska åtgärder är väl tilltagna.

Vid analyser av detta slag råder ibland brist på relevanta data, behov av att göra antaganden och förenklingar och svårigheter att få fram tillförlitliga uppgifter som dessutom är mer eller mindre osäkra. Dessa svårigheter innebär att olika riskanalyser/riskanalytiker ibland kan komma fram till motstridiga resultat på grund av skillnader i antaganden, metoder och/eller ingångsdata. Det finns flera skäl till varför systematiska riskanalyser därför är att föredra framför andra mer informella eller intuitiva sätt att hantera den stora, men långt ifrån fullständiga, kunskapsmassa som finns beträffande risker om t.ex. trafikering av undermarksanläggningar med fordon som drivs med fordonsgas. Användning av olika riskanalysmetoder innebär att befintlig kunskap insamlas, struktureras och sammanställs på ett systematiskt sätt så att kunskapsluckor kan identifieras. Detta medför att analysens förutsättningar kan prövas, ifrågasättas och korrigeras av oberoende. Riskanalysmetoderna innebär också att de antaganden och värderingar som ligger till grund för olika skattningar tydliggörs för att undvika missförstånd vid information, diskussion och förhandling mellan t.ex. beslutsfattare, verksamheter och allmänhet. (35)

Osäkerheter i kvantitativa riskanalyser kan i allmänhet hänföras till stokastiska osäkerheter (icke reducerbara) eller kunskapsbaserade osäkerheter (reducerbara) (38). I denna riskbedömning finns båda kategorierna representerade. Följande indelning av osäkerheter är i praktiken mer användbar:

- **Modellosäkerheter**
Modellosäkerheter uppkommer till följd av att en modell, konceptuell eller matematisk, oundvikligen är en förenkling av verkligheten. I denna riskanalys används ett flertal specifika modeller för kvantifiering av frekvenser och konsekvenser.
- **Fullständighetsosäkerheter**
Även en modell som korrekt beskriver de förhållanden den innefattar kan innehålla fullständighetsosäkerheter, det vill säga osäkerheter till följd av att modellen inte innehåller all relevant information. Denna analys söker ta hänsyn till i princip hela spektrat av konsekvenser av brand- och explosionsolyckor i Slussens bussterminal avseende olyckor förknippade med fordonsgas.
- **Parameterosäkerheter**
Parameterosäkerheter uppkommer till följd av att indata som används i beräkningarna är behäftade med osäkerheter. Osäkerheterna kan ha sin grund i att det studerade fenomenet innehåller naturlig variation (icke reducerbara, stokastiska osäkerheter) eller för att de verkliga värdena helt enkelt inte är kända (reducerbara kunskapsosäkerheter). I utförd analys finns osäkerheter som kan hänföras till båda dessa kategorier av osäkerheter.

Utöver nämnda osäkerhetskategorier har ett antal specifika antaganden och avgränsningar införts i konsekvensanalysen. Bland annat antas att personer som befinner sig i bussterminalen vid en olycka har ett beteende som antas vara rationellt, det vill säga reagerar på fara genom att välja att utrymma etc. Dessa bidrar också till den totala osäkerheten. Trots osäkerheterna bedöms de antaganden som gjorts vara så pass konservativa att det projektspecifika säkerhetsmålet inte överskrids.

12.3 Fortløpande riskhanteringsarbete

För att huvudalternativet skall möta upp mot grundprinciperna för säkerhetsmålet som redovisas i avsnitt 2.5.3.1 behövs ett fortløpande och regelbundet arbete med ständiga förbättringar för att sänka riskenivån. I det föreslagna kriteriet ingår ett ALARP-område inom vilket det krävs ett sådant fortløpande förbättringsarbete. Det kan dels vara administrativa och organisatoriska åtgärder och dels tekniska åtgärder för själva bussflottan. Den undre nivån i ALARP-området motsvaras av gränsen för var risker anses vara acceptabelt låga vid exploatering intill farligt gods-leder i Sverige. Dessutom är det viktigt att verksamhetsutövaren säkerställer att det i anläggningen maximalt vistas 5000 personer, t.ex. vid driftstörningar, eftersom det är en viktig förutsättning vid framtagandet av säkerhetskonceptet. Även detta kan ske både genom organisatoriska eller tekniska åtgärder eller en kombination av dessa.

13 Slutsatser

Den föreslagna markanvändningens lämplighet har bedömts utifrån risk- och säkerhetssynpunkt enligt PBL kap 1 §§ 4 och 5 samt PBL kap 2, 6§. Både nuläget, huvudalternativet och nollalternativet omfattar en stor mängd risker av olika slag. En vedertagen bedömningsgrund för att bedömma denna typ av riskpåverkan saknas, varför en projektspecifik sådan tagits fram och antagits av den framtida verksamhetsutövaren. Mot bakgrund av riskbedömningen går det att konstatera att:

- Den i detaljplanen föreslagna markanvändningen uppfyller säkerhetsmålet förutsatt att föreslagna åtgärder, som sammanfattas i ett säkerhetskoncept, genomförs. Det innebär en förhöjd men acceptabel risknivå för huvudalternativet, vilken hamnar i nivå med andra moderna trafikplanläggningar. Det innebär också ett behov av fortsatt arbete med riskreduktion.
- Både huvudalternativet och nollalternativet bedöms medföra en lägre risknivå än nuläget.
- Riskpåverkan i både huvudalternativet och nollalternativet bedöms vara likartad och inte överskrida acceptabla nivåer (säkerhetsmålet) givet att lämpliga åtgärder genomförs.

14 Referenser

1. **Stockholm stad.** Behovsbedömning och förslag till avgränsning av miljökonsekvensbeskrivning (Dnr 2014-12434). 2015.
2. **Stockholms stad.** Systemhandling Bussterminal Slussen, delområde berg, 2014-08-29. .
3. **WSP.** Byggskedesrisker som underlag till MKB - Bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i Katarinaberget. 2016.
4. **Svea Hovrätt.** Mark- och miljööverdomstolen. Dom i mål nr 2008-14. 2015.
5. **Nacka Tingsrätt.** Mark- och miljödomstolen. Dom i mål nr M 1425-12. 2014.
6. **Länsstyrelsen i Stockholms Län.** Riktlinjer för Riskanalyser som beslutsunderlag. Faktablad 4:2003. 2003.
7. **WSP.** Tekniskt underlag för detaljplan - Säkerhetskoncept. 2016.
8. **Stockholms stad.** Fördjupnings-PM Risk (FSD projekt nr 2210-009). 2011.
9. **Stockholm stad .** Reviderade planhandlingar för Slussen 2011. 2011-09-02.
10. **Stockholms stad .** Behovsbedömning och förslag till avgränsning av miljökonsekvensbeskrivning (Dnr 2014-12434). 2015.
11. **Olsson et al.** Granskning av projekt Slussen - Rapport från Expertgruppen. 2015.
12. **SSPA.** Maritima risker under byggtiden, rapport 2009 5258-04. 2011.
13. **International Electrotechnical Commission (IEC).** International Standard 60300-3-9. 1995.
14. **International Organization for Standardization (ISO).** Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards, Guide 73. Geneva : u.n., 2002.
15. **Mattsson, B.** Riskhantering vid skydd mot olyckor. Problemlösning och beslutsfattande. Karlstad : Räddningsverket, 2000.
16. **Nystedt, F.** Riskanalysmetoder. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2000.
17. **Davidsson, G.; Lindgren, M. & Mett, L.** Värdering av risk. u.o. : Statens Räddningsverk, 1997.
18. **Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.** Studie – Helhetsbild av risk inom industriparter - Del 1 – Dominoeffekter och kumulativ risk. 2015.
19. **Storstockholms brandförsvär.** Synpunkter och kommentarer på genomförd risk- och sårbarhetshantering rörande nybyggnation av Slussen. 2011.
20. **Stockholms stad.** Projektspecifikt säkerhetsmål för ny bussterminal i Katarinaberget (C4-PM-800-0901). 2016.
21. **Trafikförvaltningen i Stockholms läns landsting.** Beslut om säkerhetsmål (acceptanskriterium) för ny bussterminal i Slussen förlagd i Katarinaberget, SL 2013-1569. 2016.
22. **Boverket.** Boverkets byggregler, BBR 19, BFS 2011:6. 2011.
23. **Transportstyrelsen.** Säkerhetsmål för trafikanter i väg-, järnvägstunnlar och tunnelbana. 2016.
24. **Räddningsverket och Boverket.** Säkerhetshöjande åtgärder i detaljplaner. 2006.
25. **Boverket.** Boverkets ändring av verkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd. BFS 2013:12. 2013.
26. **E, Paté-Cornell.** Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering and System Safety* 54 . 1996.
27. **Mott MacDonald.** STEPS software. 2011.
28. **National Institute of Standards and Technology (NIST).** Fire Dynamics Simulator and Smokeview (FDS-SMV). 2011.
29. **Stockholms stad Miljö- och hälsoskyddsnämnden.** Beslut - Anmälan om inrättande av avloppsanordning för rening av vatten från bussterminalen i Katarinaberget inom fastigheten Södermalm 7:6 (Dnr. 2014-3411). 2015.
30. **WSP.** Övergripande riskbedömning av alternativa lokaliseringar av bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna. 2016.
31. **Länsstyrelsen i Stockholms län.** Lokala trafikföreskrifter(01TFS 2014:151) om förbud mot transport av farligt gods i Stockholms kommun. 2014.
32. **Energi syd.** Svenska erfarenheter av bussar med förnybara drivmedel. 2009.
33. **Statens Haverikommission.** Brand med två biogasbussar i stadstrafik i Helsingborg, Skåne Län, den 14 februari 2012. 2013.

34. **Dutch Safety Board.** *Fire in a CNG bus, Wassenaar 29 oktober 2012.*
35. **Väg- och transportforskningsinstitutet.** *VTI rapport 387:1.* 1994.
36. **Trafikverket.** *Personsäkerhet i vägtunnlar - förslag till säkerhetsmål.* Luleå : Trafikverket, 2014. TRV 2013/39057 .
37. **Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.** *Antagonistiska hot mot transporter av farligt gods - Hot, skydd och förmåga.* 2009.
38. **Abrahamsson, M.** *Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterisation and Methods of Treatment.* Lund : Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2002. Report 1024.

Appendix A – Riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal

WSP Sverige AB
121 88 Stockholm-Globen
Tel: +46 10 7225000
Fax: +46 10 7226345
<http://www.wspgroup.se>

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE





UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Appendix A - Riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bussterminal

Stockholm

2016-09-20

Uppdragsgivare

Stockholm Stad

WSP kontaktperson

Göran Nygren
121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000
WSP Sverige AB
Org nr: 556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
<http://www.wspgroup.se>

Dokumenthistorik och kvalitetskontroll

Utgåva/revidering	Utgåva 1	Revision 1	Revision 2	Revision 3
Anmärkning				
Datum	2016-09-20			
Handläggare	Jon Hellsten Göran Nygren			
Signatur				
Granskare	Daniel Rosberg			
Signatur				
Godkänd av	Göran Nygren			
Signatur				
Uppdragsnummer	10226687			
Rapportnummer				
Filnamn				

Sammanfattning

WSP har av Stockholm Stad fått i uppdrag att göra en riskanalys, med avseende på trafikering med bussar som drivs av fordonsgas, i samband med projekteringen av den planerade bussterminalen i Katarinaberget vid Slussen i Stockholm. Riskanalysen avser beskriva riskbilden för människors liv och hälsa som är förknippad med olycksrisker med fordonsgasdrivna bussar i den planerade bussterminalen.

Syftet med denna riskanalys är att utgöra ett underlag för beslut avseende eventuella skyddsåtgärder, d.v.s. val av administrativa och tekniska åtgärder, med fokus på reducering av risker genererade av användningen av fordonsgasdrivna bussar i Slussens bussterminal.

Målet med riskanalysen är att redovisa den risknivå som användningen av bussar som drivs av fordonsgas medför. I analysen skall dimensionerande tryck för det avskiljande partiet mellan busskoryta och vänthall beräknas.

Analysen avgränsas till fordonsgasdrivna bussar som kan komma att trafikera den planerade terminalen. Bedömningarna avser risken för brand och explosion i samband med utsläpp av fordonsgas.

De risker som studerats är endast sådana som är förknippade med plötsligt inträffade olyckor med konsekvenser för människors liv och hälsa, och riskerna har bedömts med avseende på dess påverkan på både anläggningens personal och resenärer.

Det driftläge som studerats är när hela terminalen är i normal drift. Resultatet av riskbedömningen gäller under de förutsättningar som anges i denna analys.

Bussterminalen kan komma att trafikeras av bussar drivna med ett antal olika bränslen. Denna utredning omfattar endast risker i samband med fordonsgasdrivna bussar där gasen är tryckkomprimerad. Riskerna med bussar som drivs av tryckkomprimerad fordonsgas bedöms vara dimensionerande och därmed täcks även för vissa andra bränslen in. Hänsyn har dock inte tagits till tryckkondenserad fordonsgas då det inte används som drivmedel i bussar i dagsläget.

Det kan konstateras att Slussens bussterminal utgör en ur riskperspektiv komplex anläggning samt att risknivån utan särskild hänsyn till extra säkerhetsåtgärder förväntas vara hög. För att erhålla en acceptabel risknivå krävs det en kombination av åtgärder av olika karaktär, vilka tillsammans leder till ett robust system.

En förutsättning för denna analys är de säkerhetssystem mm som föreslås i anläggningens säkerhetskoncept, vilka även anses vara nödvändiga.

Det avskiljande partiet mellan vänthall och busskoryta, dimensioneras för att ta upp explosionstryck på 10 kPa med en impuls på 250 ms. Vid beräkningen av det dimensionerande trycket föreligger stora osäkerheter och för att validera det dimensionerande trycket föreslås att experimentella försök genomförs.

Bland de i analysen studerade scenarierna utgör kärlsprängning samt fördröjd antändning av utsläpp av fordonsgas från stort hål på högtryckssidan (6 mm dvs rörbrott) samt utsläpp från smältsäkring (6 mm) dimensionerande scenarier gällande tryckupbyggnad och därmed krav på avskiljande partiet mellan vänthall och busskoryta.

Innehåll

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Syfte och mål	6
1.3	Avgränsningar och förutsättningar	6
1.4	Styrande dokument	7
1.5	Internkontroll	7
1.6	Rapportens struktur	8
2	Anläggningsbeskrivning	9
2.1	Säkerhetskoncept	9
3	Omfattning av riskhantering och metod	10
3.1	Begrepp och definitioner	10
3.2	Riskanalysmetoder	11
3.3	Metod för riskuppskattning	12
4	Egenskaper hos fordonsgas	14
5	Riskidentifiering	15
5.1	Inträffade händelser	15
5.2	Identifiering och beskrivning av riskkällor	15
5.3	Skadehändelser	16
5.4	Skadeverkan	17
5.5	Underlag för utsläppsberäkningar	18
6	Beskrivning av händelseträdsmodell	19
6.1	Ingående parametrar	19
6.2	Händelseträd för brand i fordonsgasbuss	19
6.3	Händelseträd för tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet	20
7	Statiska uppgifter och initiala skattningar	21
7.1	Bränder i fordonsgasdriven buss	21
7.2	Felfrekvens för tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet	22
8	Frekvens- och sannolikhetsuppskattningar	24
8.1	Frekvenser för inledande händelser	24
8.2	Sannolikheter i händelseträd för brand i fordonsgasbuss	24
8.3	Sannolikheter i händelseträd för tekniska system	27
9	Konsekvensberäkningar	30
9.1	Sammanställning scenarier	30
9.2	Extremt haveri (kärlsprängning)	30
9.3	Stort hål (rörbrott) på högtrycksledning samt läckage smältsäkring	32
9.4	Medle stort hål på högtrycksledning	33
9.5	Litet hål på högtrycksledning	34
9.6	Stort hål (rörbrott) på lågtrycksledning	34
9.7	Medelstort hål på lågtrycksledning	35
9.8	Litet hål på lågtrycksledning	36
9.9	Konsekvensberäkningar – CFD simuleringar	36
9.10	Beräkningar av dimensionerande tryck	38

10	Konsekvensuppskattningar påverkan på människor	39
10.1	Skadekriterier	39
10.2	Personantal	40
10.3	Grundläggande antaganden	40
10.4	Konsekvensuppskattning för brand i buss.....	41
10.5	Konsekvensuppskattning vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet.....	42
11	Beräknad risk	45
12	Osäkerheter och känslighetsanalys	48
12.1	Vald analysmetod	48
12.2	Osäkerheter i kvantitativ riskanalys	48
12.3	Riskanalysens berättigande.....	49
12.4	Känslighetsanalys avseende frekvensuppskattningar	50
13	Riskreducerande åtgärder.....	53
14	Diskussion.....	55
15	Slutsatser	57
16	Referenser	58

1 Inledning

WSP har av Stockholm Stad fått i uppdrag att göra en riskanalys, med avseende på trafikering med bussar som drivs av fordonsgas, i samband med projekteringen av den planerade bussterminalen i Katarinaberget vid Slussen i Stockholm. Riskanalysen avser beskriva riskbilden för människors liv och hälsa som är förknippad med olycksrisker med fordonsgasdrivna bussar i den planerade bussterminalen. Riskanalysen utgör ett beslutsunderlag avseende eventuella skyddsåtgärder samt ger förslag på framtida handlingsalternativ för att sänka risken ytterligare.

1.1 Bakgrund

Ny detaljplan för bussterminal för Nacka- och Värmdöbussarna i Katarinaberget är under utveckling. Planen syftar till att möjliggöra en bussterminal vid Slussen för kommunikationer mellan Nacka och Värmdö kommun och kollektivtrafiknoden Slussen. Till följd av att bussterminalen planeras att kunna trafikeras av bussar som drivs med fordonsgas har olycksrisken med bussarna identifierats. De bedömda konsekvensernas storlek har föranlett att en fördjupning avseende sannolikheter och konsekvenser för olyckor relaterade till fordonsgas ska genomföras för att fastställa risknivån. Denna rapport utgör en sådan fördjupning.

1.2 Syfte och mål

Syftet med denna riskanalys är att utgöra ett underlag för beslut avseende eventuella skyddsåtgärder, d.v.s. val av administrativa och tekniska åtgärder, med fokus på reducering av risker genererade av användningen av fordonsgasdrivna bussar i Slussens bussterminal.

Målet med riskanalysen är att redovisa den risknivå som användningen av bussar som drivs av fordonsgas medför. Scenariobeskrivningarna skall omfatta riskuppskattning, d.v.s. uppskattning av frekvens och konsekvens, samt ta hänsyn till planerad utformning av bussterminalen och dess säkerhetskoncept. Ett delmål är även att grovt beskriva den risknivå kopplat till bussar med fordonsgas som uppkommer på grund av att bussterminalen är placerad under mark. Vid behov identifieras och föreslås skyddsåtgärder. I analysen skall dimensionerande tryck för det avskiljande partiet mellan bussköryta och vänthall beräknas.

1.3 Avgränsningar och förutsättningar

Analysen avgränsas till fordonsgasdrivna bussar som kan komma att trafikera den planerade terminalen. Bedömningarna avser risken för brand och explosion i samband med utsläpp av fordonsgas. Beräkning av brandgasspridning på grund av brand i buss med avseende på utrymnings säkerheten utförs inte i denna analys utan genomförs inom ramen för Systemhandlingsprojekteringen.

De risker som studeras är endast sådana som är förknippade med plötsligt inträffade olyckor med konsekvenser för människors liv och hälsa, och riskerna kommer att bedömas med avseende på dess påverkan på både anläggningens personal och resenärer. Det innebär att ingen hänsyn tas till exempelvis eventuella miljörisker eller hälsorisker orsakade av långvarig exponering av fordonsgas. Inte heller risker under byggskedet, riktade våldsdåd och terrorism analyseras i denna rapport.

De hälsorisker som studeras i denna analys avser risker förknippade med brand och explosion. Fordonsgas är inte en giftig gas, men inandning av höga halter kan orsaka kvävning. Risken för kvävning studeras inte i mer detalj i denna analys.

Det driftläge som studeras är när hela terminalen är i normal drift. Provdraft och intrimning av rutiner, körmönster etc. i samband med drifttagandet av den planerade terminalen kan behöva studeras ytterligare i entreprenadtiden.

Resultatet av riskbedömningen gäller under de förutsättningar som anges i denna analys. Vid förändring av förutsättningarna såsom t.ex. antal bussar, bussterminalens utformning, ändrat bränsle mm. behöver riskbedömningen uppdateras.

Inledande händelser som brand i annan buss (ej fordonsgas) eller annan brand i busskörytan omfattas inte av denna analys då det är händelser inte bedöms medföra att anläggningens personal eller resenärer påverkas av en olycka med fordonsgas, givet att terminalen utformas i enlighet med denna handling.

Bussterminalen kan komma att trafikeras av bussar drivna med ett antal olika bränslen, såsom etanol, biodiesel, elhybrider och fordonsgas. Denna utredning omfattar endast risker i samband med fordonsgasdrivna bussar där gasen är tryckkomprimerad. Riskerna med bussar som drivs av tryckkomprimerad fordonsgas bedöms vara dimensionerande och därmed täcks även för vissa andra bränslen såsom etanol, biodiesel och elhybrider in. Hänsyn har dock inte tagits till tryckkondenserad fordonsgas då det inte används som drivmedel i bussar i dagsläget.

En olycka sker ofta plötsligt och oförutsett, men konsekvenserna av händelsen kan vara i princip momentana (dödsfall p.g.a. splitter) eller mer utdragna (skador på räddningsmanskaper, stillestånd i trafik, överbelastade sjukhus). Eftersom fokus i denna riskanalys ligger på att bedöma de omedelbara konsekvenserna avseende personskada studeras primärt ett kort tidsintervall, d.v.s. några tiotals minuter, från det att olyckan inträffar.

Observera att risknivån genomgående i rapporten skattas konservativt men trots det så realistiskt som möjligt. De antaganden som införs i rapporten syftar således i allmänhet till att beskriva det bedömt troligaste utfallet.

I den händelsesträdsmodell som används beaktas inte brandspridning till fordon som inte involveras i den ursprungliga olyckan. Avgränsningen bedöms acceptabel då brandspridning till andra bussar antas ske efter att utrymning har skett samt att sprinkler är avsedd att förhindra brandspridning.

I analysen antas ventilationssystemet alltid vara i funktion när bussterminalen är öppen för trafik. Ventilationssystemet är utfört med redundans.

1.4 Styrande dokument

Risken analysen upprättas som ett underlag för beslut om den planerad markanvändningens lämplighet. Enligt Plan- och bygglagen (2010:900) ska byggnadsverk bl. a. ha tekniska egenskapskrav i fråga om bärförmåga, stadga och beständighet samt säkerhet vid användning. Detta dokument tas fram för att kunna utgöra underlag för att de tekniska egenskapskraven tillgodoses.

1.5 Internkontroll

Rapporten är utförd av Göran Holmstedt (Professor emeritus), Jon Hellsten, Lars Antonsson och med Göran Nygren som Teknikansvarig för brand och utrymning. Samtliga är brandingenjörer och civilingenjörer i riskhantering. I enlighet med WSP:s miljö- och kvalitetsledningssystem, certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001, omfattas denna handling av krav på internkontroll. Detta innebär bland annat att en från projektet fristående person granskar förutsättningar och resultat i rapporten. Ansvarig för denna granskning har varit Daniel Rosberg (Brandingenjör) och Johan Lundin (brandingenjör/teknisk doktor).

1.6 Rapportens struktur

Text i *kursiv stil* utgör moment för vidare utredning under bygghandlingsskede. Preliminära besked kan komma att ändras i senare skede efter fortsatt utredning.

För att beskriva rapportens uppbyggnad samt skapa en övergripande bild av rapporten presenteras nedan en innehåll i respektive avsnitt.

Kapitel 1 – Inledning. I kapitlet beskrivs syftet och målet med analysen. Vidare anges de avgränsningar som gjorts i analysen.

Kapitel 2 – Anläggningsbeskrivning. I kapitlet beskrivs anläggningens utformning övergripande. I kapitlet anges även förutsättningar för analysen i form av antal bussar och personer som anläggningen dimensioneras för samt en kort genomgång av anläggningens säkerhetskoncept. Säkerhetskonceptet är en beskrivning av de säkerhetsåtgärder som vidtas i anläggningen och som ligger till grund för denna analys.

Kapitel 3 – Omfattning av riskhantering och metod. Kapitlet innehåller en beskrivning av begrepp och definitioner, arbetsgång och omfattning av riskhantering i projektet samt de metoder som använts.

Kapitel 4 – Egenskaper hos fordonsgas. Egenskaperna hos fordonsgas beskrivs.

Kapitel 5 – Riskidentifiering. Kapitlet innehåller identifiering och beskrivning av riskkällor. I kapitlet beskrivs även några inträffade olyckor.

Kapitel 6 – Beskrivning av händelsesträd. I kapitlet beskrivs de parametrar som används i händelseträden kortfattat.

Kapitel 7 – Statistiska uppgifter och initiala skattning. I kapitlet beskrivs underlaget för de för beräkningen av frekvensen av de inledande frekvenserna.

Kapitel 8 – Frekvens och sannolikhetsuppskattningar. Kapitlet beskriver de sannolikheter och frekvenser som används i händelseträden. Statistiskt underlag och motivering av genomförde skattningar beskrivs.

Kapitel 9 – Konsekvensberäkningar. Kapitlet beskriver kortfattat genomförda beräkningar för strålning från jetflammar samt strålning och tryckverkan från explosioner. Beräkningarna beskrivs mer omfattande i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas i bilagor. Kapitlet beskriver även de beräkningar som genomförts för att beräkna det dimensionerande trycket för avskiljningen mellan vänthallen och busskörytan samt beräkna konsekvensavstånd för människor med avseende på tryck.

Kapitel 10 – Konsekvensuppskattningar påverkan på människor. Kapitlet beskriver de konsekvenser som de olika scenarierna medför för människor i anläggningen. Baserat på konsekvensberäkningarna i kapitel 9 görs skattningar om antalet människor som kan omkomma vid respektive scenario.

Kapitel 11 – Beräknad risk. I kapitlet genomförs beräkningar av risk d.v.s. en sammanvägning av sannolikhet och konsekvens.

Kapitel 12 – Osäkerheter och känslighetsanalys. I detta kapitel diskuteras vald analysmetod och osäkerheter som förknippas med riskanalysen.

Kapitel 13 – Riskreducerande åtgärder. I detta kapitel diskuteras genomförda riskreducerande åtgärder samt förslag på ytterligare riskreducerande åtgärder.

Kapitel 14 – Diskussion. I detta kapitel diskuteras resultatet i analysen.

Kapitel 15 – Slutsats. I detta kapitel dras slutsatserna i analysen.

Kapitel 16 – Referenser. I kapitlet anges de referenser som används i analysen.

2 Anläggningsbeskrivning

Slussens nya bussterminal är planerad att byggas i ett nytt bergrum inom Katarinaberget och bestå av vänthall, busskörytor och entréer för på- och avstigande, infart till terminalen från Stadsgårdsleden (infartstunnel) samt diverse tekniska utrymmen. Bussterminalen ansluter till tunnelbana och intilliggande handel via det som kallas för mellanplanet vars huvudentré är från Katarinavägen.

2.1 Säkerhetskoncept

Som en förutsättning för denna analys ligger anläggningens säkerhetskoncept [30]. Säkerhetskonceptet är en beskrivning av de säkerhetsåtgärder som anläggningen utrustas med. Anläggningen utförs med följande säkerhetsåtgärder:

1. Utrymningen av anläggningen dimensioneras så att tillfredsställande utrymning kan ske. Detta bygger på att det finns tillräcklig kapacitet i utrymningsvägar, utrymningsvägarna skyltas mm. Anläggningen förses med brandgasventilation som startas automatiskt av det automatiska brandlarmet men kan även styras av räddningstjänsten från brandlarmscentral samt från ledningsfunktionen.
2. Hela anläggningen förses med automatiskt släcksystem. Busskörytan förses med ett fast släcksystem så kallat deluge-system med högt vattenflöde. Ett deluge-system innebär att en hel eller flera sektioner med sprinklerhuvuden aktiveras vid detektion.
3. Bärverket i busskörytan dimensioneras i enlighet med regler för tunnlar. Bärande konstruktion, stomkompletteringar och avskiljande d.v.s. lättkonstruktion i busskörytan dimensioneras för att klara förhöjda tryckupbyggnader på grund av en fördröjd antändning i ett utsläpp av fordonsgas. Dimensionerande tryck beräknas i denna analys.
4. Anläggningen delas brandtekniskt in i olika brandceller för att säkerställa att tillfredsställande utrymning kan ske samt för att begränsa konsekvenserna av en eventuell brand. Vid dimensioneringen av den brandtekniska avskiljningen mellan bussköryta och vänthall tas särskild hänsyn till uppkomst av jetflamma i bussar med fordonsgas samt explosion av ett utsläpp av fordonsgas.
5. Bussterminalen förses med inomhusbrandposter och stigarledningar.
6. Anläggningen bör ombesörjs av en ledningsfunktion. Ledningsfunktionen har till uppgift att övervaka och styra funktioner vid brand eller andra oönskade händelser av anläggningen. Ledningsfunktionen har möjlighet att manuellt styra olika funktioner i bussterminalen.
7. Fläktsystemet i busskörytan samt installationer valv/tak av bussköryta och infartstunnel utformas med EX-klassning (ATEX).
8. Utrymningsvägar förses med system för trycksättning av utrymme för att brandgaser inte ska sprida sig till utrymmet.
9. Hela anläggningen förses med ett automatiskt brandlarm med fullständig övervakning. Bussköryta inkl. infartstunnel förses med två olika typer av detektionssystem för brand och ett system för att kunna detektera fordonsgas.
10. Hela anläggningen förses med ett utrymningslarm med informativt talat meddelande.
11. Anläggningen förses med system för trafikstyrning.
12. Anläggningen förses med CCTV.

3 Omfattning av riskhantering och metod

Detta kapitel innehåller en beskrivning av begrepp och definitioner, arbetsgång och omfattning av riskhantering i projektet samt de metoder som använts.

3.1 Begrepp och definitioner

Risk avser kombinationen av sannolikheten för en händelse och dess konsekvenser. Sannolikheten anger hur troligt det är att en viss händelse kommer att inträffa och kan beräknas om frekvensen d.v.s. hur ofta något inträffar under en viss tidsperiod är känd.

Riskanalys omfattar, i enlighet med de internationella standarder som beaktar riskanalyser i tekniska system [3] [4], dels riskidentifiering och dels riskuppskattning. Riskidentifieringen är en inventering av händelseförlopp (scenarier) som kan medföra oönskade konsekvenser, medan riskuppskattningen omfattar en kvalitativ eller kvantitativ uppskattning av sannolikhet och konsekvens för respektive scenario.

Efter att riskerna analyserats görs en riskvärdering för att avgöra om riskerna kan accepteras eller ej. Som en del av riskvärderingen kan även ingå förslag till riskreducerande åtgärder och verifiering av olika alternativ. Det sista steget i en systematisk hantering av riskerna kallas riskreduktion/kontroll. I det skedet fattas beslut mot bakgrund av den värdering som har gjorts av vilka riskreducerande åtgärder som ska vidtas.

Riskhantering avser hela den process som innehåller analys, värdering och reduktion/kontroll, se Figur 1, medan riskbedömning normalt enbart avser analys och värdering av riskerna.

Definition av begrepp:

Deflagration explosion i en fordonsgas-/luftblandning där reaktionszonen breder ut sig i omgivande atmosfär med en hastighet mindre än ljudets.

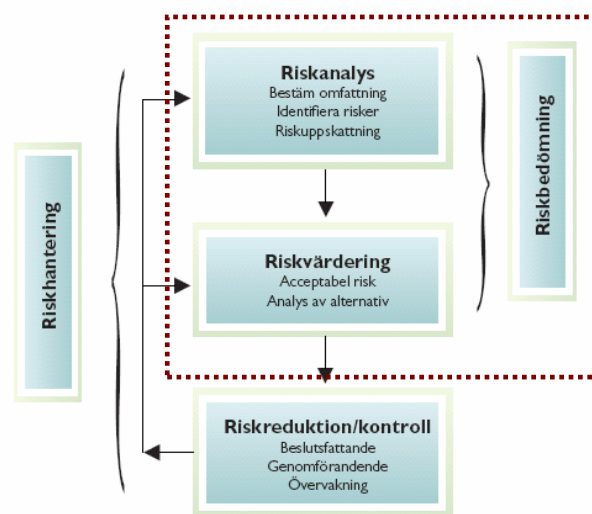
Detonation explosion i en fordonsgas-/luftblandning där reaktionszonen breder ut sig i omgivande atmosfär med en hastighet större än ljudets.

Dominoeffekt är den effekt som uppstår då en skadehändelse inom ett riskobjekt utlöser skadehändelse hos ett annat riskobjekt så att skadeverkan eskalerar. Ett exempel kan vara en jetflamma som sprider brand till flera bussar som i sin tur sprider branden vidare.

Fordonsgas kan vara såväl förnybar (biogas) som fossil (naturgas). Fordonsgasen förutsätts i denna analys vara tryckkomprimerad. Hänsyn tas inte till tryckkondenserad gas.

Konsekvens är den skadeverkan ett scenario ger på sin omgivning, exempelvis skadan till följd av värmestrålning vid brand. Konsekvens avser i denna analys påverkan på människors liv och hälsa.

Riskkälla är i denna analys en detalj eller ett objekt i en gasbuss bränslesystem som ger upphov till risk. Ett exempel på riskkälla är en bränsletank (gasflaska).



Figur 1. Riskhanteringsprocessen samt omfattning av riskhantering i projektet (punktstreckad linje).

Risk Med risk avses kombinationen av frekvensen för en händelse och dess konsekvenser. Vid kvantifiering används sambandet: $Risk = Frekvens \times Konsekvens$

Riskenivå är det sammanvägda resultatet av sannolikhet och konsekvens för respektive skadehändelse.

Riskobjekt är ett objekt eller en verksamhet som innehåller en eller flera riskkällor som ger upphov till risk. Ett exempel på riskobjekt är en gasbuss.

Sannolikhet/frekvens används ofta synonymt trots att det finns en skillnad mellan dem. Frekvensen uttrycker hur *ofta* något inträffar under en viss tidsperiod till exempel antalet bränder per år och kan därigenom anta värden som är både större och mindre än 1,0. Sannolikheten anger istället hur *troligt* det är att en viss händelse kommer att inträffa och anges som ett värde mellan noll och ett. Kopplingen mellan frekvens och sannolikhet utgörs av att den senare kan beräknas om den första är känd.

Scenario är den händelse eller det händelseförlopp som medför skadeverkan från en riskkälla.

Skadeverkan är den skada eller konsekvens som en riskkälla ger upphov till, exempelvis skadan till följd av brand eller explosion.

Säkerhetskoncept Ett *säkerhetskoncept* består av de tekniska, organisatoriska och administrativa åtgärder som avser reducera frekvensen för olyckor och/eller minska deras konsekvenser till en för objektet godtagbar nivå. Vad som utgör en godtagbar nivå, eller med andra ord i säkerhetssammanhang, vad som utgör en acceptabel riskenivå, definieras i allmänhet av den rådande säkerhetsambitionen. Att uppfylla kraven i svensk lagstiftning utgör en vanlig och fullt acceptabel säkerhetsambition. En sådan ambition innebär att ett minimum av säkerhetsåtgärder och installationer införs och följaktligen till en riskenivå som är i linje med acceptabel riskenivå. Ett säkerhetskoncept skall medföra en acceptabel riskenivå med avseende på personskada, egendomsskada (kulturmiljö) och miljöska (naturmiljö).

3.2 Riskanalysmetoder

Riskanalysen baseras på litteraturstudier, erfarenhetsmässiga bedömningar, statistik, handberäkningar och händelseträds metodik. Analysen är således såväl kvalitativ som kvantitativ till sin natur.

Scenarierna beskrivs i analysen kvantitativt. Kvantitativa metoder är helt numeriska och beskriver således risker med kvantitativa termer, exempelvis förväntat antal omkomna per år [5].

Händelseträds metodiken är ett verktyg för att på ett systematiskt sätt ta fram och illustrera en olyckas möjliga förlopp beroende på vilka skyddsbarriärer som finns och hur de fungerar. Dessa barriärer kan bestå av såväl tekniska, organisatoriska som administrativa åtgärder. Manuell brandbekämpning, fast släcksystem och fysiska barriärer utgör exempel på skyddsbarriärer. Händelseträd kan sägas vara en illustration över möjliga olycksscenarioer som kan uppkomma till följd av en inledande händelse. I denna analys är de inledande händelserna brand i fordon som leder till explosion eller jetflamma samt utsläpp av fordonsgas p.g.a. defekt som leder till explosion alternativ jetflamma. Följande övergripande moment utförs inom riskanalysen:

- Litteraturstudie, inläsning och kunskapsinhämtning.
- Kvalitativ analys av objektet och dess förutsättningar.
- Val av inledande händelser samt relevanta och representativa olycksscenarioer.
- Uppbyggnad av händelseträd.
- Kvantitativ uppskattning av frekvensen för de olika inledande händelserna samt sannolikhetsfördelningar i träd. Uppskattning av frekvensen för de inledande händelserna och sannolikhetsfördelningarna sker på olika sätt beroende på hur tillgängligt underlag ser ut och dess tillämpbarhet. För flera av skattningarna saknas relevant underlag, vilket betyder att dessa skattningar är att betrakta som grova.

- Beräkning av konsekvenser för de olika scenarierna. I analysen genomförs handberäkningar såväl som datorsimuleringar.
- Uppskattning av påverkan på människor. Utifrån genomförda konsekvensberäkningar har antalet personer som omkommer vid respektive olycksscenario uppskattats utifrån resonemang om hur många personer som kan finnas inom riskområdet vid de olika tillfällena.
- Beräkning av risk.
- Känslighets- och osäkerhetsanalys.
- Riskreducerande åtgärder.
- Diskussion.
- Slutsatser.

3.3 Metod för riskuppskattning

Konsekvenserna av olika skadescenarier uppskattas utifrån litteraturstudier, datorsimuleringar och handberäkningar. Konsekvensuppskattningar redovisas mer omfattande i bilagor.

I denna detaljerade riskanalys har riskmåttet samhällsrisk och individrisk använts för att uppskatta risknivån med avseende på identifierade risker förknippade med användning av bussar med fordonsgas.

3.3.1 Individrisk

Individrisken är sannolikheten att omkomma för en person som kontinuerligt vistas på en specifik plats, t.ex. i eller i närheten av en buss i bussterminalen [7]. Individrisken är platsspecifik och är oberoende av hur många personer som vistas i det givna området. Syftet med riskmåttet är att se till att enskilda individer inte utsätts för oacceptabla risknivåer.

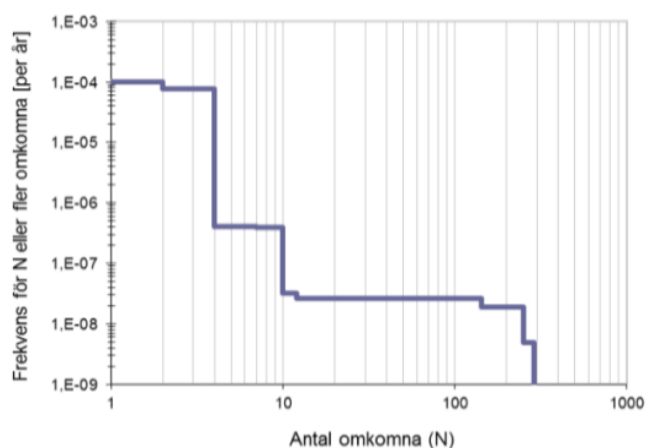
I denna riskbedömning har dock individrisken betraktats som en aktivitetsspecifik risk snarare än en platsspecifik risk. För individrisk används därför ett aktivitetsbaserat riskmått, dvs. sannolikheten att omkomma per tillfälle som byte sker i bussterminalen. Att använda ett platsspecifikt riskmått bedöms inte vara lika relevant i ett sammanhang där ett flöde av människor är mer dominerande som princip än att personer vistas på en specifik plats varaktigt.

Aktivitetsbaserade riskmåttet redovisas i form av frekvensen att omkomma per år om man befinner sig i eller i närheten av en buss i bussterminalen.

3.3.2 Samhällsrisk

Riskmåttet samhällsrisk beaktar hur stora konsekvenserna kan bli med avseende på antalet personer som påverkas vid olika skadescenarier. Hänsyn tas till eventuella tidsvariationer, som att persontätheten i området kan vara hög under en begränsad tid på dygnet eller året och låg under andra tider.

Samhällsriskens redovisas ofta med en F/N-kurva (Frequency/Number), se Figur 2, som visar den ackumulerade frekvensen för N eller fler omkomna till följd av de antagna olycksscenarierna.



Figur 2. Exempel på F/N-kurva för beskrivning av samhällsrisk.

I F/N-kurvan illustreras hur ofta olyckor sker med ett givet antal omkomna personer, och det går således att särskilja på frekvensen av olyckor med en liten konsekvens och olyckor med stor konsekvens. Eftersom axlarna i grafen är logaritmiska är det svårt att avgöra hur stor skillnaden mellan två (eller flera) givna kurvor är. Därför kan samhällsriskens även presenteras som ett förväntat antal omkomna per år. Detta tal kan ses som ett medelvärde av hur många som förväntas omkomma per år, och utgör ett mått på farligheten ur ett samhällsperspektiv.

4 Egenskaper hos fordonsgas

Fordonsgas kan vara såväl förnybar (biogas) som fossil (naturgas). I båda fallen är den huvudsakliga beståndsdelan metan. Den fordonsgas som driver SL:s bussar består vanligen av en blandning av naturgas och biogas där merparten av molekylerna är förnybara, d.v.s. biogas. I Tabell 1 och Tabell 2 anges typisk sammansättning samt fysikaliska och kemiska egenskaper för fordonsgas [7].

Tabell 1. Typisk sammansättning för biogas.

Komponentnamn	Innehåll
Metan (CH ₄)	> 97 %
Koldioxid	< 2,0 %
Nitrogen	< 0,8 %
Oxygen	< 0,2 %
Svavelväte	< 0,00005 %
Tetrahydrotiofen	< 0,0010 %

Tabell 2. Typiska fysikaliska och kemiska egenskaper för biogas.

Fysikaliskt tillstånd vid 20°C	Komprimerad gas
Färg	Färglös gas
Lukt	Distinkt och otrevlig om odöriserad, annars doftlös. Luktämne (odörisering) Tetrahydrotiofen (THT)
Relativ densitet (luft=1)	Lättare än luft d.v.s. <1
Vattenlöslighet [mg/l]	Icke känd men anses ha låg löslighet
Brännbarhetsgränser [vol% i luft]	ca 5-15 % gasinblandning i luft vid markatmosfärstryck samt i det normala utom- och inomhustemperaturområdet
Självantändningstemperatur [°C]	> 600 °C kring lufttrycket en atmosfär
Minsta tändenergi (MIE)	0,3 mJ (Vätgas har 0,017 mJ)

5 Riskidentifiering

Detta kapitel innehåller identifiering och beskrivning av riskkällor.

5.1 Inträffade händelser

Enlig svensk och norsk statistik [8] brinner ca 1-2 [1] bussar av 100 av per år. Brandförloppen i bussar är mycket snabba. Statistiken gäller bussar oavsett drivmedel. Någon särskild statistik som gäller brand i bussar som drivs av fordonsgas har inte hittats vid genomförda litteraturstudier.

Olyckor med bussar som drivs av fordonsgas kan leda till utsläpp av fordonsgas. Inträffade olyckor visar att brand i buss kan medföra jetflammar från bränsle systemet som både är riktade uppåt och åt sidan. Vid en litteratursökning har nedanstående olyckor med bussar som drivs av fordonsgas identifierats. Vid samtliga olyckor har bussarna börjat brinna och till följd av branden har jetflammar bildats från bränslesystemet. I samtliga fall har smältsäkringarna i bränslesystemen fungerat som avsett.

- 1 Bussbranden vid Strandbadsvägen i Helsingborg.
- 2 Bussbranden vid Ättekullagatan i Helsingborg.
- 3 Bussbranden vid Tornavägen i Lund.
- 4 Bussbranden vid Wittenburgerweg i Holland.

För bussbranden vid Ättekullavägen i Helsingborg genomförde Statens Haverikommission [10] en utredning av olyckan.

Haverikommissionens sammanfattning och rekommendationer berör inte bussarnas system för fordonsgas eller utformning av anläggningar som trafikeras med sådana fordon. Haverikommissionens rekommendationer berör:

- räddningstjänstens rutiner vid insats i bussar och i bussar med fordonsgas
- fasta släcksystem för motorrum i bussar
- kontroll av släcksystems funktion i den ordinarie fordonsbesiktningen
- yrkesförarutbildningen för bussförare utökas och anpassas med övningar inom brandsäkerhet och utrymning.

Utredningen befäster även att olyckor med biogas som drivmedel kan medföra hastiga förlopp och att potential till stor skada därmed finns. Ett antal olika scenarier med sådan händelseutveckling studeras närmare i denna rapport och kartläggningen av sådana scenarier utgör en del av den vidare riskidentifieringen.

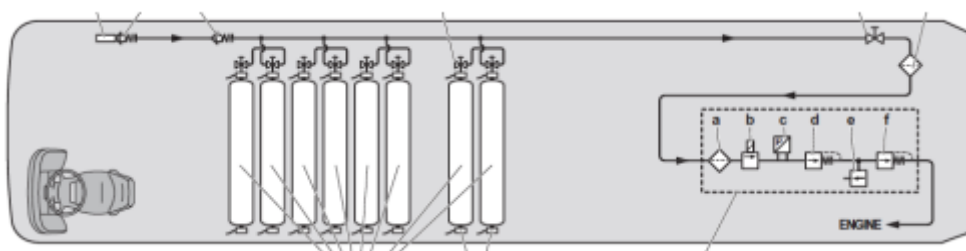
Nedan identifieras olyckor med fordonsgasbussar som leder till jetflammar och gasmolnsexplosion samt kärlsprängning. I Sverige finns det dock ingen dokumenterad olycka med explosion eller kärlsprängning i en buss med fordonsgas. Internationellt finns det dock dokumenterade olyckor med bussar som drivs av fordonsgas där det har skett explosioner, t ex en explosion i en fordonsgasdriven buss i Syd Korea. Omständigheterna kring dessa olyckor framgår dock inte men finns dokumenterade på film.

5.2 Identifiering och beskrivning av riskkällor

Följande huvudsakliga riskkällor har identifierats i en gasbuss bränslesystem.

F (flaskor)	Bränsletankarna (gasflaskor)
H (Högtryck)	Ledningssystem med tillhörande armatur (högtryck)

S (Säkerhetsutrustning)	Säkerhetsutrustning (felfungerande smältsäkring på högtrycksidan eller utlöst smältsäkring p.g.a. bussbrand)
L (Lågtryck)	Ledningssystem med tillhörande armatur (lågtryck, efter tryckreducering)



Figur 3. Schematisk bild över flaskpaket, ventiler och rör på fordonsgasbuss. Vy ovanifrån. Figuren är hämtad från fordonshandboken till Volvo-bussar.

5.3 Skadehändelser

Skadehändelser kan uppstå av en mängd olika skäl och resultera i olika förlopp. Hur allvarligt ett scenario som inkluderar utsläpp av fordonsgas slutligen blir är beroende av en mängd faktorer, exempelvis vad som initierar utsläppet, vilken del i en buss bränslesystem som genererar utsläppet, hur omfattande utsläppet är, om och i så fall när utsläppet antänds samt vilken påverkan utsläppet får på människor i bussen eller dess omgivning.

Två orsaker till skadehändelser som medför utsläpp av fordonsgas är bussbrand (där branden initialt uppstår av annan orsak än utsläpp av just fordonsgas) samt felfungerande utrustning i fordonsgassystemet.

Figur 4 och Figur 5 visar exempel på utbränd gasbuss (Linköping 2005-01-28).



Figur 4. Invändigt tak i utbränd gasbuss. Sotade cylindriska bränsletankar skymtar genom de nedsmälta hålen i taket.



Figur 5. Bränsletankar på ovansida tak av utbränd gasbuss.

Figur 6 visar exempel på säkerhetsutrustning (s.k. smältsäkring) i en gasbuss bränslesystem. Smältsäkringen aktiveras vid ca 110-130°C och förblir öppen efter att den har aktiverats. Smältsäkringens syfte är att tryckavlasta gasflaskorna vid höga temperaturer för att undvika höga tryck i flaskorna och risk för kärlsprängning.



Figur 6. Exempel på säkerhetsutrustning (s.k. smältsäkring).

5.4 Skadeverkan

Den skadeverkan som utvärderas i denna analys är:

Brand, kan uppstå vid antändning av brännbar fordonsgasblandning (i luft). Brand kan uppstå som jetflamma, beroende av utsläppets karaktär, omfattning och antändningsförhållanden. Jetflammas utsträckning och värmestrålningen från den studeras i analysen. Flamman och värmestrålningen från den kan sprida brand till andra bussar samt kan påverka personer i terminalen.

Explosion, kan uppstå som deflagration vid förbränning av fordonsgas i luft. Sådan explosion i ett slutet utrymme kan skapa en tryckvåg. Hastigt frigörande av upplagrad energimängd i en gasbuss bränsletankar (kärlsprängning) kan också skapa en tryckvåg. Förutom själva tryckvågen kan en explosion sprida kaststycken, splitter och brand i omgivningen.

5.5 Underlag för utsläppsberäkningar

Tankningstrycket för fordonsgasdrivna bussar är i Sverige begränsat till högst 200 bar vid 15 °C.

För ledbussar är den totala lagringskapaciteten i bussarnas bränsletankar (gasflaskor) ca 400 Nm³ [1].

Storleken av ett gasutsläpp från bränslesystemets högtrycksdel är beroende av bränsletankarnas fyllnadsgrad och därtill avhängigt tryck samt area och geometri för utsläppspunkten. Om bussarna tankar ca 200 Nm³ per dygn så är medelfyllnadsgraden ca 75 % (300 Nm³) och det avhängiga medeltrycket i bränslesystemets högtrycksdel d.v.s. ca 150 bar. En gasflaska har vanligen en volym på 200 liter vilket motsvarar 30 m³ gas i en flaska. Detta motsvarar i sin tur ca 20 kg metan.

Storleken av ett gasutsläpp från bränslesystemets lågtrycksdel är på motsvarande sätt beroende av bränsletankarnas fyllnadsgrad samt area och geometri för utsläppspunkten. Trycket i bränslesystemets lågtrycksdel är beroende av bussfabrikat och motortyp (insprutningssystemets behov och tryckregulatorns reglerområde). Vid hög belastning av Otto-motorer är trycket upp till ca 15 bar och vid tomgång omkring 5 bar. Vid trafik inom terminalen kommer motorn inte att belastas särskilt hårt. Trycket i bränslesystemets lågtrycksdel kommer då sannolikt ligga mellan ca 5-10 bar.

Bränsleledningarnas diameter varierar något mellan bussfabrikaten, men ligger vanligen omkring ca 6 mm. Fyllningsledningarna är något grövre vanligen ca 10-12 mm.

6 Beskrivning av händelseträdsmodell

Beräkning av risknivån i slussens bussterminal sker med hjälp av en händelseträdsmodell. Händelseträdsmodellen byggs upp för att motsvara en logisk struktur av vilka händelseförlopp som kan inträffa till följd av de olika inledande händelserna brand i fordonsgasbuss samt tekniskt fel på utrustning. I och med att det problem som analyseras är komplext blir också analysmodellerna komplexa. I detta kapitel redogörs för händelseträdsmodellens uppbyggnad och vilka förutsättningar och antaganden den bygger på i syfte att ge en viss grad av transparens i beräkningsgången. Händelseträdsmodellen är omfattande och kan därför inte redovisas i sin helhet på ett begripligt sätt.

6.1 Ingående parametrar

Händelseträdsmodellen består förenklat av ett antal mindre händelseträd som kopplas samman till ett nätverk av olika händelseträd. De ingående parametrarna i händelseträdsmodellen beskrivs översiktligt utifrån följande principiella indelning:

- Händelseträd för brand i fordonsgasbuss
- Händelseträd för tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet

I nedanstående avsnitt beskrivs dessa delar mer utförligt.

6.2 Händelseträd för brand i fordonsgasbuss

Händelseträdet utgår från att en fordonsgasbuss börjar brinna. Brandens uppkomst kan bero på sammanstötning, tekniskt fel/självtändning eller anlagd brand. Med detta som utgångspunkt byggs trädet utifrån de parametrar (grenar) som redovisas nedan. Observera att vissa parametrar endast utgör en precisering av enskilda andra parametrar, d.v.s. det finns parametrar som endast är relevanta för vissa händelseutvecklingar och scenarier. Sådana parametrar redovisas indraget i förhållande till de som används för samtliga parametrar.

- Trafiksituation (Högtrafik/Lågtrafik/Nattrafik)
- Olycksplats (Infartstunnel/Avstigning/Påstigning/Kröken/Vänteläge)
- Startobjekt (Motor/däck/busskupé)
- Fordonssprinkler fungerar (Ja/Nej)
- Branden släcks i tidigt skede manuellt (Ja/Nej)
- Detektionssystem fungerar (Ja/Nej)
- Sprinkleranläggning fungerar (Ja/Nej)
- Del av utrustning som påverkas (Flaska/Smältsäkring/Ingen)
- Antändning sker (Ja/Nej)
- Typ av antändning (Fördröjd/Direkt)

- Riktning Jetflamma (Uppåt/Sida)
- Brandspridning till intilliggande buss (Ja/Nej)

6.3 Händelseträäd för tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet

Händelseträdet utgår från att ett utsläpp av fordonsgas sker till följd av ett tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet. Med tekniskt fel menas utrustning som fallerar i p.g.a. sammanstötning mellan bussar, utmattning eller fabriktionsfel. Med detta som utgångspunkt byggs trädet utifrån de parametrar (grenar) som redovisas nedan.

- Trafiksituation (Högtrafik/Lågtrafik/Nattrafik)
- Olycksplats (Infartstunnel/Avstigning/Påstigning/Kröken/Vänteläge)
- Detektionssystem fungerar (Ja/Nej)
- Del av utrustning som påverkas (Högtrycksledning/Lågtrycksledning/Flaska/Smältsäkring)
- Storlek på hål (Stort/Mellan/Litet)
- Rörbrottsventil fungerar (Ja/Nej)
- Antändning sker (Ja/Nej)
- Typ av antändning (Födröjd/Direkt)
- Riktning Jetflamma (Uppåt/Sida)
- Brandspridning till intilliggande buss (Ja/Nej)

7 Statiska uppgifter och initiala skattningar

I detta kapitel redovisas de statistiska uppgifter och beräkningar som ligger till grund för dels skattningar av olycksfrekvenser och dels skattningar av enskilda sannolikheter inom ramen för händelseträdsmodellen.

Observera att vissa skattningar presenteras inom ramen för decimalteckens noggrannhet. Att värdena beskrivs på detta sätt skall inte missuppfattas som representera exakthet utan presenteras på detta sätt för att förenkla för läsaren att följa rapporten och skilja olika värden från varandra.

Anledningen till att antaganden inom ramen för händelseträdsmodellen sker mot bakgrund av andra statistiska uppgifter och skattningar är att användandet av modellen inte i sig garanterar någon riktighet, huvudsakligen eftersom den inte utgör en verifierad beräkningsmodell.

Genom att justera antagandena inom händelseträdsmodellen baserat på tidigare och ”oberoende” beräkningar erhålls sannolikt en god approximation så länge som samtliga antaganden bedöms vara rimliga. Att värden är rimliga kontrolleras huvudsakligen mot referenslitteratur.

I denna inledande analys används separata statistiska uppgifter för att beräkna:

- Förväntat antal bränder i bussfordon. I denna analys används statistik från Sverige och Norge [8].
- Förväntat antal bussbränder uppkomna på grund av tekniskt fel. I denna analys används statistik för naturgasledningarna då det saknas underlag för fel på tekniska system i bussar.

Brand i fordon via kollision mellan bussar inne i bussterminalen har i denna analys inte särskilts från brand i buss p.g.a. tekniskt fel utan innefattas i förväntat antal bussbränder i bussterminalen. Detta utgör en förenkling. Statistiskt underlag pekar mot att uppkomsten av brand på grund av kollision utgör en relativt liten andel av det totala antalet. Amerikansk statistik [9] mellan åren 1988-1992 som redovisar brandorsak i fordon visar att kollisioner och andra trafikolyckor utgör mindre än 2 % av alla fordonsbränder. Freiholtz [10] redovisar att andelen bränder med orsak trafikolycka ligger under 10 % av alla fordonsbränder, normalt mellan 1 och 5 %. Dessa uppgifter stämmer väl överens med sannolikheterna som anges i fransk statistik [11], vilka beroende på fordonskategori anger värden mellan 1,5 och 3,5 %.

Hastigheten i bussterminalen kan generellt förväntas vara låg 10-20 km/h vilket ytterligare gör att kollisionsskador på delar av bränslesystemet och andelen bränder uppkomna på grund av kollision kan förväntas sjunka. Den använda statistiken särredovisar dessutom inte brandorsaken varpå brand i buss orsakad av kollision ändå antas medräknas. Då hastigheterna är förhållandevis låga antas inte kollisionerna i sig utgöra en tillskjutande risk.

7.1 Bränder i fordonsgasdriven buss

Det har i denna analys inte hittats någon statistik som gäller brand i bussar som drivs av fordonsgas. Därtill är den tillgängliga statistiken på bussar av mer generellt slag och särredovisar inte olika typer av bussar t.ex. bussar i linjetrafik och charterbussar mm. Detta gör att startfrekvensen för brand i fordonsgasdriven buss är relativt grov, detta bedöms dock inte beskriva något annat än de faktiska förhållandena för denna typ av anläggning där i princip alla typer av bussar ska kunna trafikera samt det faktum att bussar frekvent byts ut mot nya modeller etc.

Enlig svensk och norsk statistik [8] brinner ca 1-2 [1] bussar av 100 av per år.

Beräknat antal buss bränder i Slussen bussterminal följer följande förutsättningar:

- Bussterminalen har tre karaktäristiska trafiksituationer [31]:
 - o Högtrafik, 7 tim, morgon och eftermiddag, genomsnitt 216 bussar/tim

- Lågtrafik, (normaltrafik) 9 tim, eftermiddag och kväll, genomsnitt 65 bussar/tim
- Nattrafik, 8 tim, genomsnitt 12 bussar/tim
- På helger antas halva dagen utgöras av lågtrafik medan andra halvan utgörs av nattrafik.
- Bussterminalen trafikeras av totalt ca 37 linjer till Nacka och Värmdö. Linjeturen tar i genomsnitt 80 minuter.
- Bussarna bedöms vara i terminalen ca 10 min av en hel busstur.
- Samtliga framtida bussar antas drivas med fordonsgas.

Följande uttryck ger sannolikheten för brand i fordonsgasbuss i Slussens bussterminal med ovanstående antaganden för vardagar i högtrafik. Uttrycket för lågtrafik och nattrafik är detsamma med undantag för antalet bussar och tiden i bussterminalen.

Brand i buss =

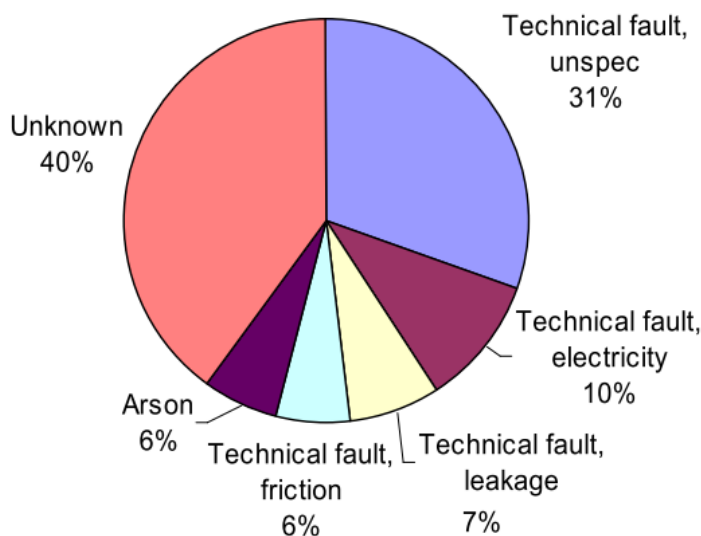
[Antal bussar som brinner per år]x[Antal bussar i trafik]x[Andel av dygn]x[Andel i terminalen]x[andel dagar per vecka]

$$\text{Högtrafik} = \left[\frac{1}{100} \right] \times [216] \times \left[\frac{7}{24} \right] \times \left[\frac{10}{80} \right] \times \left[\frac{5}{7} \right] = 5,63E - 02$$

Totala sannolikheten för brand i buss blir då 7,48E-02, d.v.s. omräknat till frekvens ca 1 brand var 13,4 år.

7.1.1 Brandorsakberäknat

Brandorsaken avseende brand i buss är enligt tillgänglig statistik [14]:



Figur 7 Brandorsak bussbrand.

Det kan antas att detta stämmer överens med bussar i linjetrafik relativt väl, dock kan andelen anlagda bränder vara något högre i SL bussar än i chartrade bussar. Brandorsaken har en avgörande roll för hur snabbt ett olycksförlopp sker vilket har vägts in i de antaganden som är genomförda i analysen.

7.2 Felfrekvens för tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet

Vid identifieringen av möjliga utsläppskällor identifierades fyra olika utsläppskällor. Dessa är rörsystem högtrycksledning, rörsystem lågtrycksledning, flaskorna samt smältsäkringar. Det finns

även andra komponenter i bränslesystemet som kan utgöra källa för ett läckage av fordonsgas. Dessa komponenter bedöms dock innefattas i de fyra utsläppskällor som har identifierats.

Det finns mycket lite statistik för felfrekvenser på utrustning i gasfordon. För att hitta statistik har andra typer av gassystem använts som underlag. För naturgasledningar samt finns viss statistik för bland annat läckage på rör medan det finns mer allmän statistik för fel på trycksatta flaskor samt säkerhetsventiler. Statistik för säkerhetsventiler har använts för smältsäkringar i brist på underlag.

Felfrekvenser för rör [12] visar att det är mer sannolikt med små läckage än stora. Felfrekvensen för ett litet hål är $1E-5$ per timme och km medan felfrekvensen för medelstort och stort är $1E-6$ och $1E-7$ per timme och km. I beräkningarna görs bedömningen att det finns ca 30 meter rör i en buss. Av denna rörlängd antas hälften vara högtrycksledning och andra hälften antas vara lågtrycksledning.

Felfrekvensen för trycksatta flaskor samt säkerhetsventiler är $5E-7$ respektive $2E-5$ per år [13]. Det antas att varje buss är utrustad med 10 flaskor samt med en smältsäkring per flaska.

Sammantaget ger detta att den inledande felfrekvensen för fel i tekniska system är $2,15E-3$ per år och buss.

På samma sätt som brand i buss beräknas den totala felfrekvensen för bussterminalen genom att addera med antal bussar som rör sig i bussterminalen per timme samt antalet timmar som de rör sig i bussterminalen. För högtrafik är det 216 bussar/timme i 7 timmar, lågtrafik 65 bussar/timme i 9 timmar och för nattrafik är det 12 bussar/timme i 8 timmar. På helger antas halva dagen utgöras av lågtrafik medan andra halvan utgörs av nattrafik. Det ger en inledande frekvens på $2,05E-2$ per år omräknat till frekvens ca 1 fel var 49 år.

8 Frekvens- och sannolikhetsuppskattningar

I detta kapitel redovisas antagna värden avseende frekvenserna för de inledande händelserna trafikolycka respektive brand till följd av fordonssdefekt samt sannolikheter för respektive parameter som ingår i modellen för skattning av individrisk och samhällsrisk.

Observera att vissa skattningar presenteras inom ramen för decimalteckens noggrannhet. Att värdena beskrivs på detta sätt skall inte missuppfattas som representera exakthet utan presenteras på detta sätt för att förenkla för läsaren att följa rapporten och skilja olika värden från varandra.

8.1 Frekvenser för inledande händelser

8.1.1 Brand i fordonsgasbuss

Mot den bakgrund som redovisas i avsnitt 7.1 beräknas felfrekvensen för brand i buss i bussterminalen per år till $7,48E-02$, d.v.s. omräknat till frekvens ca 1 brand var 13,4 år.

8.1.2 Tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet

Mot den bakgrund som redovisas i avsnitt 7.2 beräknas felfrekvensen för fel i tekniska system i bussterminalen per år till $2,05E-02$, d.v.s. omräknat till frekvens ca 1 brand var 49 år.

8.2 Sannolikheter i händelsetråd för brand i fordonsgasbuss

8.2.1 Trafiksituation

Antalet bussrörelser i bussterminalen varierar över dygnet och det bedöms viktigt att skilja på vilken trafiksituation som en olycka inträffar vid. Trafiksituationen förenklas till att bestå av antingen högtrafik, lågtrafik eller nattrafik.

Baserat på information om högtrafik, lågtrafik och nattrafik i avsnitt 7.1 kan fördelningen mellan högtrafik, lågtrafik och nattrafik beräknas genom att dividera antalet bussar per timme med för respektive trafiksituation med det totala antalet bussar per timme. Det ger en fördelning mellan högtrafik, lågtrafik och nattrafik till 59, 35 respektive 6 %.

8.2.2 Olyckslast

Ett olycksscenario kan komma att utvecklas på olika sätt och ger olika utfall beroende på var olyckan inträffar. Slussens bussterminal har i analysen delats upp i *infartstunnel*, *avstigning*, *reglering*, *kröken* samt *påstigning* för att kunna beakta de olika konsekvenserna av en olycka.

Fördelningen av olycksplats mellan ovanstående har gjorts utifrån en uppskattning av hur lång tid bussarna befinner sig på respektive plats. Bussarna antas befinna sig i bussterminalen i totalt 10 minuter. Av dessa har antagandet gjorts att det tar totalt ca 1 minut att köra in och ut genom infartstunneln, 2,5 minuter att lämna av passagerare på avstigningen och att medel regleringstiden är ca 2,5 minuter. Vidare antas det att det tar 0,5 minuter att köra ifrån avstigning till påstigning, genom kröken, samt 3,5 minuter att hämta passagerare på påstigningen.

Med ovanstående resonemang blir fördelningen mellan de olika platserna följande:

- Infartstunnel 10 %
- Avstigning 25 %
- Reglering 25 %

- Kröken 5 %
- Påstigning 35 %

8.2.3 Startobjekt

Bussbränder delas in i motorrumsbrand, däckbrand och brand i busskupé beroende på var branden startar. Motorrumsbränder kan uppkomma på grund av exempelvis varma delar som strålar på exempelvis brännbara motordelar, läckage mm. De bakomliggande orsakerna till däckbränder är ofta lågt däcktryck eller punktering, men även bromsar m.m. kan av olika orsaker förorsaka brand. Brand i busskupén kan bero på exempelvis elfel eller anlagd brand.

Sannolikhetsfördelningen mellan bussbrandskategorierna motorrum, däck och övrigt anges i en amerikansk studie avseende ”charter, tour, passenger buses” till cirka 60 %, 20 % och 20 % [14]. Studien gäller amerikanska bussförsäkringsbolaget Lancers statistik över anmälda skador för åren 2007-2011.

I en finländsk studie [15] utgjordes underlaget av: 50 % bussar i lokaltrafik, 25 % ”chartered buses” och 25 % långfärdsbussar. Av de studerade bussarna var de flesta diesalbussar, men 5 % drevs på fordonsgas. 10 av bränderna, d.v.s. 8 % startade i förarutrymmet eller passagerarutrymmet. Två av bränderna var anlagda. Av de bränder som uppkom utanför kupén spreds i storleksordningen 9 % in i kupén. Sannolikhetsfördelningen mellan bussbrandskategorierna motorrum, ”additional heater area”, däck och övrigt kan enligt studien sammanfattas som 50 %, 10 %, 27 % respektive 13 %.

Stadsbussar förutses med bakgrund av ovan generellt ha en högre andel motorrumsbränder (och lägre andel däckbränder) än långfärdsbussar.

Sannolikhetsfördelningen för bussterminalen ska spegla bussar i stadstrafik. Samtidigt bedöms kupébranden utgöra det allvarligaste hotet mot flaskpaketen på fordonsgasdrivna bussar, varför denna sannolikhet inte bör underskattas.

Följande bedömt rimliga och konservativa sannolikhetsfördelning antas för bussterminalen: 70 % motorrumsbrand, 15 % däckbrand och 15 % busskupé.

8.2.4 Fordonssprinkler

Före 2004 skedde cirka 6-7 bussbränder som startade i motorrummet per år i Sverige med resultatet att bussen blev helt utbränd [16]. Under 2004 införde försäkringsbranschen krav på motorrumssprinkler i alla svenska försäkrade bussar. Sedan dess har ingen liknande händelse inträffat. Detta anses påvisa att motorrumssprinkler i allmänhet är effektiva vad gäller att förhindra att brand i motorrummet sprider sig vidare i bussen och leder till totalskada.

I avsaknad av annan information antas mot denna bakgrund grovt att sannolikheten att en motorrumssprinkler framgångsrikt släcker (eller kraftigt begränsar under erforderlig tid) en brand som uppstår i motorrummet är 50 %. Då motorrumssprinklern anses fungera antas ingen skada uppstå på fordonets bränslesystem. Skattningen bedöms vara konservativ.

8.2.5 Branden släcks i tidigt skede manuellt

Det finns mycket litet information som kan användas som underlag för denna skattning. En fransk studie finns dock, enligt denna släcktes 40 % av bränderna med handbrandsläckare av trafikanter medan resterande 60 % av bränderna krävde att räddningstjänsten släckte [17]. Vidare finns en annan fransk studie [11] där sannolikheterna för brandsläckning av brand i fordon generellt kan utläsas till 60 % och 66 % för farligt gods-fordon respektive övriga fordon.

I en finsk studie redovisas att handbrandsläckare användes i 91 av 126 bussbränder, d.v.s. i 72 % av fallen. I 78 av 91 fall, d.v.s. i 86 % av fallen där handbrandsläckare nyttjades, begränsades eller

släcktes branden. Av detta ges att det i manuell brandsläckning var framgångsrik i 78 av 126 fall, d.v.s. i 62 % av fallen då brand uppstått.

Det bedöms kvalitativt som att sannolikheten för brandsläckning är något högre i bussterminalen eftersom det vistas mycket personer i bussarnas närhet samt att tillgången till släckutrustning bedöms som bättre än i tunnlar som statistiken baseras på.

I analysen antas att manuell brandsläckning med hjälp av handbrandsläckare och/eller inomhusbrandposter är framgångsrik i 70 % av fallen vid bussbrand i bussterminalen, detta oavsett var den uppkommer (orsak). Hänsyn tas här till att det finns tillgång till inomhusbrandposter i anslutning till uppställningsplaster. Vidare förutsätts det finnas handbrandsläckare på samtliga bussar.

8.2.6 Detektionssystem fungerar

Bussterminalen utrustas med ett antal redundanta och/eller oberoende system som tillsammans innebär att en trafikolycka (med eller utan efterföljande brand) eller brand förväntas detekteras snabbt och med hög sannolikhet. I bussterminalen finns även CCTV kopplad till ledningsfunktionen som möjliggör tidig upptäckt och manuell aktivering av system. Det antas att sannolikheten för att detektionssystemen fungerar är 98 %. En hög sannolikhet motiveras med två typer av detektion, det finns mycket människor i rörelse som kan larma samt att det finns CCTV övervakning som möjliggör tidig upptäckt.

8.2.7 Sprinkleranläggning fungerar

I denna analys förutsätts att ett väl dimensionerat och utprovat system som utförs på ett sätt att det i erforderlig utsträckning samverkar med ventilationsstrategin och tar hänsyn till de ventilationsmässiga förhållanden som förväntas har potential att kontrollera brandtillväxten i en buss (begränsa brandens storlek) och förhindra brandspridning mellan bussar. Det förutsätts vidare att släcksystemet aktiveras automatiskt (eventuellt med kort fördröjning) och manuellt, d.v.s. strax efter branddetektion. Funktionen förutsätts vara oberoende av hur personalen i ledningsfunktionen agerar. Funktionen förutsätts också vara oberoende av övriga parametrar, såsom trafiksituation och huruvida ventilationsstrategin fungerar, vilket är en grov förenkling.

Att det fasta släcksystemet fungerar innebär här att släcksystemet får avsedd verkan, d.v.s. släcksystemet kontrollerar och begränsar brand i en buss så att flaskor och smältsäkringar inte påverkas innan utrymning har skett samt förhindrar brandspridning mellan bussar.

För det gällande säkerhetskonceptet med fast släcksystem måste skillnad göras på vilken typ av olycksförlopp som avses. Funktionen bedöms vara avhängig av om branden detekteras eller ej. I de fall detektionssystem inte fungerar som avsett antas inte heller det fasta släcksystemet fungera, d.v.s. sannolikheten att fast släcksystem fungerar ansätts till 0 % för samtliga scenarier där detektionssystemet inte fungerar. Aktivering kan dock fortfarande ske manuellt.

Funktionssannolikheten/tillgängligheten hos det fasta släcksystemet förutsätts vara hög till mycket hög, detta förutsätter att systemet är väl underhållet. Detta är ett normalt antagande för fasta släcksystem i allmänhet. Sannolikheten att det fasta släcksystemet aktiveras som planerat, givet att detektionssystemen fungerar som avsett, antas till 97 % [20] [21].

Även om det fasta släcksystemet aktiveras som planerat bedöms det finnas en risk att brandtillväxten är så snabb att brandstorleken överstiger den dimensionerade kapaciteten hos släcksystemet eller att släckverkan är begränsad på grund av att branden är placerad i kupén och vattnet inte når branden. I dessa fall bedöms sprinklerverkan reduceras eller i värsta fall helt uteblir.

Vattenpåföring från ett fast släcksystem bedöms ha potential att kyla flaskorna på taket på ett sådant sätt att smältsäkringar inte aktiveras eller att en kärlsprängning inte inträffar innan utrymning har skett. Det uppskattas att vattenpåföringen förhindrar kärlsprängning eller aktivering av smältsäkringar i 50 % av fallen.

8.2.8 Del av utrustning som påverkas

En kärlsprängning kan inträffa om en flaska med tryckkomprimerad gas värms upp så snabbt att tryckökningen leder till att flaskan rämna. Detta resulterar i att gasen momentant släpps ut. Om direkt antändning sker resulterar detta i ett mycket stort eldklot. En kärlsprängning antas kunna uppstå i en oskadad flaska, utan fungerande smältsäkring på mer än en av bussens flaskor. Smältsäkringen måste felfunktionera på mer än en flaska eftersom flaskorna är tryckutjämnade mot varandra och därmed kan tömmas via varandra. Sannolikheten för att ovan givna förutsättningar skall infalla samtidigt och leda till en kärlsprängning bedöms vara liten, uppskattningsvis 1 %.

En brand kan påverka hela bränslesystemet såsom flaskor, ventiler smältsäkringar, rörsystem.

Ett hål på ett rör eller läckage p.g.a. läckande ventiler bedöms i sin tur resultera i en påverkad flaska eller smältsäkring. Då en påverkad flaska eller smältsäkring bedöms leda till en större konsekvens analyseras endast dessa två delar. Vid ett hål på ett rör finns dessutom en rörbrottsventil som skall förhindra ett läckage. I analysen görs antagandet att jetflammar som bildas vid brand i buss kommer från smältsäkringarna. Sannolikheten för att en smältsäkring skall påverkas av en brand i buss bedöms vara 99 %.

8.2.9 Antändning sker

Utsläppet av fordonsgas föranleds i detta händelsefall av en bussbrand. Eftersom bussen redan brinner antas det att sannolikheten för antändning av gasutsläppet är mycket stor. Antändning antas ske i 95 % av utsläppen.

8.2.10 Typ av antändning

Givet att antändning sker antas denna kunna ske på två olika sätt, fördröjt eller direkt. För fordonsgas bedöms två initiala scenarier kunna uppstå beroende av typen av antändning. Om den, under tryck, läckande gasen antänds omedelbart uppstår en jetflamma. Om gasen inte antänds direkt kan det uppstå ett brännbart gasmoln som sprids med i luften och kan antändas senare.

Utsläppet av fordonsgas föranleds i detta händelsefall av en bussbrand. Eftersom bussen redan brinner antas det att sannolikheten för direkt antändning av gasutsläppet är mycket stor. Direkt antändning antas ske i 99 % av utsläppen. Det ger att sannolikheten för fördröjd antändning skattas till 1 %.

8.2.11 Riktning Jetflamma

Riktningen på jetflamman beror på riktning på smältsäkringarna i bussen. En sådan jetflamma delas in i två olika riktningar, uppåt och sidled. Då det saknas statistik på vilken andel smältsäkringar som är riktade uppåt. I analysen görs antagandet att 75 % ifrån människor d.v.s. 25 % mot människor.

8.3 Sannolikheter i händelsefall för tekniska system

8.3.1 Trafiksituation

Se kapitel 8.2.1.

8.3.2 Olyckslast

Se kapitel 8.2.2.

8.3.3 Detektionsystem fungerar

Se kapitel 8.2.6

8.3.4 Del av utrustning som påverkas

Vid identifieringen av möjliga utsläppskällor identifierades fyra olika utsläppskällor. Dessa är rörsystem högtrycksledning, rörsystem lågtrycksledning, flaskorna samt smältsäkringar. Det finns även andra komponenter i bränslesystemet som kan utgöra källa för ett läckage av fordonsgas. Dessa komponenter bedöms dock innefattas i de fyra utsläppskällor som har identifierats.

Det finns mycket lite statistik för felfrekvenser på utrustning i gasfordon. För att hitta statistik har andra typer av gassystem använts som underlag. För naturgasledningar samt finns viss statistik för bland annat läckage på rör medan det finns mer allmän statistik för fel på trycksatta flaskor samt säkerhetsventiler. Statistik för säkerhetsventiler har använts för smältsäkringar i brist på underlag.

Fördelningen av påverkan på utrustning har beräknats utifrån felfrekvenserna angivna i avsnitt 7.2 och ger att sannolikheten för ett läckage på högtrycksledningen respektive lågtrycksledningen är 45 %. Vidare beräknas sannolikheten för ett läckage på en smältsäkring till 9,9 % vilket ger att sannolikheten för ett haveri på en flaska är 0,1 % [13].

8.3.5 Storlek på hål

Storlek på hål berör parametrarna högtryck och lågtryck i föregående gren.

Utifrån felfrekvenserna som anges i avsnitt 8.3.4 kan fördelningen mellan de olika läckagestorlekarna beräknas. Beräkningar visar att sannolikheten för att ett läckage kommer från ett stort hål är 1 % medan ett medelstort är 9 % och ett litet är 90 %.

8.3.6 Rörbrottsventil fungerar

Rörbrottsventilen konstruktion medför att endast större läckage stoppas. Det ger att vid små eller mellanstora hål samt läckage på lågtryckssidan förhindras inte alls av rörbrottsventilen.

Vid ett rörbrott antas rörbrottsventilen ge avsedd effekt d.v.s. stoppa läckaget, i 90 % av fallen.

8.3.7 Antändning sker

Underlag för bedömning av sannolikhet för antändning är mycket bristfällig.

Utsläppet av fordonsgas orsakas av ett tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet. På högtryckssidan som framförallt är placerad på taket på bussarna finns det begränsat med tändkällor. Dessutom utförs elektriska installationer i taket med ex-klassad utrustning vilket minskar sannolikheten för antändning. Sannolikheten för att antändning skall ske vid utsläpp på högtryckssidan antas med ovanstående resonemang till 20 %.

För lågtryckssidan som till stor del finns i motorns närhet ansätts sannolikheten för antändning till 50 %.

8.3.8 Typ av antändning

Givet att antändning sker antas denna kunna ske på två olika sätt, fördröjt eller direkt.

För fordonsgas bedöms två initiala scenarier kunna uppstå beroende av typen av antändning. Om den, under tryck, läckande gasen antänds omedelbart uppstår en jetflamma. Om gasen inte antänds direkt kan det uppstå ett brännbart gasmoln som sprids med i luften och kan antändas senare.

Utsläppet av fordonsgas orsakas av ett tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet. Eftersom det till skillnad från brand i buss finns begränsat med tändkällor i utsläppets direkta närhet har sannolikheten för direkt antändning antagits vara relativt låg. För högtryckssidan där det finns färre tändkällor antas fördröjd antändning ske i 90 % av utsläppen vilket ger att direkt antändning bedöms ske i 10 % av fallen.

För lågtrycksidan som till stor del finns i motorns närhet ansätts fördelningen mellan fördröjd och direkt antändning vara lika d.v.s. 50 %.

8.3.9 Rikting Jetflamma

Riktningen på jetflamman beror delvis på var i systemet som jetflamman bildas (hål på rör eller från en smältsäkring) samt riktning på smältsäkringarna i bussen. En sådan jetflamma delas in i två olika riktningar, uppåt och sidled. Då det saknas statistik på vilken andel smältsäkringar som är riktade uppåt. I analysen görs antagandet att 75 % ifrån människor d.v.s. 25 % mot människor.

9 Konsekvensberäkningar

I detta kapitel redovisas de konsekvensberäkningar som har genomförts för att undersöka vilka strålningsnivåer som uppkommer från olika storlekar på jetflammar samt vilka trycknivåer som uppkommer vid olika storlekar på utsläpp. Beräkningarna ligger sedan till grund för skattningen av förväntat antal omkomna.

Beräkningarna har genomförts dels som handberäkningar och dels har några utvalda scenarier beräknas med datorsimuleringar. Resultatet av handberäkningarna redovisas i avsnitt 9.1 - 9.8 nedan. För mer noggrann redovisning av beräkningarna hänvisas till Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [31], Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 2 [32] och Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 3 [33].

Datorsimuleringar genomförs för ett stort och medelstort utsläpp på högtrycksledningen. Resultatet av datorsimuleringarna presenteras i avsnitt 9.9. För mer noggrann redovisning av beräkningarna hänvisas till Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 5 [35].

9.1 Sammanställning scenarier

Följande scenarier har beräknats:

1. Extremt haveri (kärlsprängning)
2. Stort hål (6 mm) på högtrycksledning och explosion
3. Stort hål (6 mm) på högtrycksledning och jetflamma
4. Medelstort hål (1,9 mm) på högtrycksledning och explosion
5. Medelstort hål (1,9 mm) på högtrycksledning och jetflamma
6. Litet hål (0,75 mm) på högtrycksledning och explosion
7. Litet hål (0,75 mm) på högtrycksledning och jetflamma
8. Stort hål (6 mm) på lågtrycksledning och explosion
9. Stort hål (6 mm) på lågtrycksledning och jetflamma
10. Medelstort hål (1,9 mm) på lågtrycksledning och explosion
11. Medelstort hål (1,9 mm) på lågtrycksledning och jetflamma
12. Litet hål (0,75 mm) på lågtrycksledning och explosion
13. Litet hål (0,75 mm) på lågtrycksledning och jetflamma
14. Utsläpp smältsäkring och explosion
15. Utsläpp smältsäkring och jetflamma

9.2 Extremt haveri (kärlsprängning)

En gasflaska med komprimerad gas som spricker eller om ett större hål slås upp i flaskan leder till följande konsekvenser:

1. Utsläpp av brännbar gas. Gasutsläppet kan resultera i sekundära effekter som t.ex. en s.k. fireball, en eldklot, där all gas förbränns på ett par sekunder med medföljande höga infallande strålningsnivåer för objekt som finns i närhet av eldklot.
2. Kärlet brister och fragment kan slungas ut. Delar av gasens kompressionsenergi överförs till rörelseenergi hos fragment som kan bli projektiler som kan transporteras lång väg och skada allt de träffar på sin väg.

3. Orsakar en stötvåg, övertryck, på grund av gasens expansion. Delar av kompressionsenergin övergår till rörelseenergi hos den utsläppta gasen och förorsakar en stötvåg som kan förstöra eller sända iväg föremål.

Vanligtvis finns det två skäl till att en gasflaska sprängs, antingen blir övertrycket större än flaskans designtryck eller har flaskans hållfasthet försämrats.

Vanligaste orsak till att flaskans designtryck överskrider är överfyllning, uppvärmning där inte smältsäkringen utlöser eller fel på tryckregulatorn.

Vanligaste orsak till att hållfastheten försämras är att flaskan oxideras, rostar, materialfel, nötning på grund av vibrationer eller kollision med annat objekt (fordonskollision).

Nedan behandlas konsekvenserna 1,2 och 3 separat.

9.2.1 Gasutsläppet antänds och bildar ett eldklot s.k. fireball

Beräkningar har genomförts för ett eldklot och på vilka riskavstånd som detta leder till. Riskavståndet har beräknats till oskyddad hud (2:a gradens brännskador) som funktion av mängden gas i flaskorna. Beräkningarna visar att riskavståndet till oskyddad hud är ca 30 meter för en gasmängd på 20 kg.

Beräkningarna är behäftade med osäkerhet främst beroende på att man inte kan förutsäga exakt hur utsläppet ser ut d.v.s. hur flaskan brister. Bedömningen har fått göras med utgångspunkt från empiriska formler från gasutsläpp utomhus. På grund av osäkerheterna, främst på grund av skattningen av eldklotets geometriska utbredning och läge över marken har det valts att sätta en säkerhetsfaktor 2 på riskavståndet för utsläppet.

Eldklotets varaktighet är ca 4 sekunder.

9.2.2 Konsekvens med fragment

När en gasflaska brister frigörs den lagrade tryckenergin. Tryckenergin har räknats om till en mängd TNT (M_{TNT}).

Beroende hur kärlet brister kan tryckverkan få olika utfall.

Om hela ventilhuvudet brister blir all expansionskraft riktad åt ett håll. Är hålet stort, större än några cm^2 , blir den resulterande kraften så stor att flaskan riskerar slita sig från sin förankring och flyga som en projektil som kan nå hela busstunnelns längd och penetrera genom andra bussar eller avgränsningen mot vänthallen.

Hur många fragment som bildas varierar med från fall till fall. Små flaskor ger vanligtvis färre fragment. För gasflaskorna på bussarna uppskattas fragmenten understiga 5. Vid kärlsprängning eller större brott slungas fragment av olika storlekar lång väg från bussen upp till mer än 100 meter. Stora fragment som träffar en människa kan vara dödliga.

Fragment kan i närfältet förstöra gasledningar och ventiler till andra närliggande gasflaskor och därmed öka utsläppet av brännbar gas.

Stora fragment kan penetrera skyddsbarriären, avskiljande konstruktion, till vänthallen beroende på barriärens hållfasthet.

9.2.3 Konsekvens av stötvåg

När kärlet brister expanderar gasen med en stötvåg som följd. Styrkan på stötvågen på olika avstånd, x , från centrum av explosionen kan man uppskatta med TNT-metoden.

Inom 2 meter från centrum av explosionen uppkommer mycket stora materiella skador. Takskyddet kommer att kastas av. Risk för att andra gasflaskors ledningar skadas finns. Fara finns för att busstaket viker sig kan eventuellt föreligga med åtföljande gasutsläpp inne i bussen.

Trycket har beräknats till 10 kPa på ett avstånd av 12-13 meter.

Beräkningarna är genomförda under förutsättning att TNT-ekvivalentberäkningen fungerar för det aktuella fallet. Beräkningarna bedöms vara mycket konservativa då det bl.a. inte tas någon hänsyn till den dämpande effekt på tryckvågen som takhöljet över flaskorna medför.

9.3 Stort hål (rörbrott) på högtrycksledning samt läckage smält-säkring

Beräkningar för läckage och ett stort utsläpp av fordonsgas har genomförts för utsläpp via en smält-säkring (6 mm) på högtrycksdelen (150 bar). Gasflödet beräknas till 0,34 m³/s vilket motsvarar 0,22 kg/s som är ett medelvärde för 150 bars tryck under 10 minuters utsläpp med ett hål på 6 mm.

Ett stort utsläpp av fordonsgas till följd av en utlöst smält-säkring vid 150 bar, beräknas initialt medföra ett utsläpp i storleksordningen ca 0,9 kg/s (inberäknat temperatur-/tryckhöjning i gasflaskan t.f. av brandpåverkan). I detta utflöde finns också en viss konservativ överskattning beroende av utsläppskoefficienten (C_d) t.f. av hålets geometri valts till 1,0.

Direkt antändning av utsläppet leder initialt till en jetflamma med en brandeffekt som beräknats till 30-45 MW, beroende av hur mycket den utströmmande gasen hinner hettas upp till följd av gasflaskans brandpåverkan. Brandeffekten kommer att avta allt eftersom gasflaskorna töms. Utsläppsflödet och därmed brandeffekten har beräknats sjunka till en tredjedel av det initiala, d.v.s. 0,3 kg/s eller 15 MW, efter 2 minuter.

9.3.1 Explosionsberäkningar

Fördelning av utsläppet

Gasutsläppets fördelning i taket är beroende av ett flertal variabler såsom insuget av luft i jeten, utbredning i höjd- och sidled, utsug av gasblandningen i ventilationskanaler mm. Medelkoncentrationen och den mängd fordonsgas med en koncentration över undre brännbarhetsgränsen i övre delen beräknas vid varierande ventilation i utsuget.

För en volym i övre delen av busskörtytan som är 500 m³ beräknas den undre brännbarhetsgränsen nås efter ca 1,5 – 2,5 minuter. Efter 10 minuter innehåller volymen 20-80 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort.

För en volym i övre delen av busskörtytan som är 1000 m³ beräknas den undre brännbarhetsgränsen nås efter 2,5 – 5 minuter. Efter 10 minuter innehåller volymen 40-100 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort.

Beräkningar för tryckverkan har genomförts för ett stort utsläpp (40 kg i 500 respektive 1000 m³) på högtrycksidan.

Stora läckage medför att gasen släpps ut fort, i storleksordning 1 kg/s d.v.s. under 2 till 3 minuter släpps den största mängden av gaserna i flaskorna ut. Utsläppet sker då i en relativt liten volym. För att med hjälp av ventilation hindra koncentrationen från att överstiga undre brännbarhetsgränsen krävs det lokalt mycket stora flöden. Lokalt krävs en luftväxling på över 20-30 ggr/timme för att ventileras bort tillräckligt mycket gas för att undre brännbarhetsgränsen inte skall nås. Det är inte rimligt att dimensionera ventilationen för så väldigt stora flöden.

Tryckverkan

Utifrån storleksordningen på den mängd fordonsgas som har en koncentration övre undre brännbarhetsgränsen kan explosionstrycket och förbränningsvågens längd beräknas grovt.

Vid ett stort utsläpp kan trycknivåer upp till ca 60 kPa, 0,6 bar, uppkomma vid ett gasmoln som är 500 m³. Avståndet till ca 20 kPa, 0,2 bar, har beräknats till ca 25 meter medan avståndet till 10 kPa, 0,1 bar, har beräknats till ca 40 meter.

Med samma mängd fordonsgas utbrett i en större volym uppkommer trycknivåer upp till ca 20 kPa, 0,2 bar.

Flammorna från en explosion i ett stort utsläpp beräknas nå ca 10 meter från gasmolnets centrum.

9.3.2 Jetflamma

Flamlängden har beräknats till 10-12 meter initialt. Efter 2 minuter har den reducerats till ca 7,5 meter för att sedan fortsätta att minska när trycket sjunker.

Flammorna från naturgas blir inte optiskt tjocka (emissionsfaktorn blir avsevärt mindre än 1) vilket resulterar att strålningsöverföringen till omgivningen blir mindre än för tyngre kolväten. Detta återspeglas i den fraktion av effektutvecklingen som strålar ut för naturgasflammar, F , blir mindre än för tyngre kolväten. Strålningsberäkningarna har utförts med en emissivitet på 0,2. Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kommer att kunna antända material såsom trä, plast eller gummi (12,5 kW/m² under ca 10 minuter) är initialt endast några meter runt flammen (2-4 meter).

Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 18 meter (efter 2 minuter upp till ca 10 meter).

Avstånden som anges är runt flammen vilket medför att de är mycket längre i flammans längdriktning. Vanligtvis är smältsäkringen riktad uppåt vilket medför att flammen slår i taket och strålningsnivåerna runt flammen är de ovan angivna.

Vid det ovan angivna scenariot står redan bussen i brand vilket medför att det redan finns höga strålningsnivåer runt bussen.

9.4 Medle stort hål på högtrycksledning

Beräkningar har genomförts för ett läckage från ett medelstort hål (1,9 mm) på högtrycksledningen (150 bar). Gasflödet beräknas till 0,07 kg/s initialt och sjunker sedan till ca 0,04 efter 10 minuter. Detta ger ett medelvärde på ca 0,055 kg/s under 10 minuter.

Direkt antändning av utsläppet leder initialt till en jetflamma med en brandeffekt som beräknats till ca 3,5 MW.

9.4.1 Explosionsberäkningar

Tryckberäkningar för uppbyggnad av gaskoncentration har inte genomförts för detta utsläpp eftersom scenariot är likvärdigt med ett rörbrott på lågtryckssidan. Då undre brännbarhetsgränsen inte uppnås vid spridningsberäkningarna för rörbrott på lågtryck (se avsnitt 9.6) görs bedömningen att undre brännbarhetsgränsen inte uppnås för medelstort hål på högtrycksledningen.

9.4.2 Jetflamma

Flamlängden har beräknats till 3,6 meter initialt.

Strålningsberäkningarna har utförts med en emissivitet på 0,2. Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 18 meter i flammans längsriktning och 3,5 meter i sidled från flammen.

I längdled anges det konvektiva riskavståndet d.v.s. strömmande varma luft/brandgaser som alstras av jetflamman. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. Det konvektiva riskavståndet satts till c:a 5*flamlängden.

9.5 Litet hål på högtrycksledning

Beräkningar har genomförts för ett läckage från ett litet hål (0,75 mm) på högtrycksledningen (150 bar). Gasflödet beräknas till 0,015 kg/s initialt.

Direkt antändning av utsläppet leder initialt till en jetflamma med en brandeffekt som beräknats till ca 0,75 MW.

9.5.1 Explosionsberäkning

Tryckberäkningar för gaskoncentrationen i ett gasmoln från ett utsläpp från ett litet hål har inte genomförts eftersom spridningsberäkningarna för större hål visar att undre brännbarhetsgränsen inte uppnås.

9.5.2 Jetflamma

Flamlängden har beräknats till 1,4 meter initialt.

Strålningsberäkningarna har utförts med en emissivitet på 0,2. Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 7 meter i flammans längsriktning och 1,7 meter i sidled från flammen.

I längdled anges det konvektiva riskavståndet. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. Det konvektiva riskavståndet satts till c:a 5*flamlängden.

9.6 Stort hål (rörbrott) på lågtrycksledning

Beräkningar för läckage och ett medelstort utsläpp av fordonsgas har genomförts för ett rörbrott (6 mm) på lågtrycksdelen (10 bar). Gasflödet för läckaget på lågtrycksdelen beräknas till 0,06 m³/s.

9.6.1 Explosionsberäkning

Fördelning av utsläppet

Gasutsläppets fördelning i taket är beroende av ett flertal variabler såsom insuget av luft i jeten, utbredning i höjd- och sidled, utsug av gasblandningen i ventilationskanaler mm. Medelkoncentrationen och den mängd fordonsgas med en koncentration över undre brännbarhetsgränsen i övre delen beräknas vid varierande ventilation i utsuget.

Beräkningarna för ett medelstort utsläpp visar att gaskoncentrationen efter 10 minuter inte når upp till undre brännbarhetsgränsen om volymen på övre skiktet är större än 250 m³ även om ventilationen endast är 0,5 m³/s.

Vid eventuell antändning av gaserna i det övre lagrat beräknas mängden fordonsgas i det övre lagret vara omkring 4-18 kg.

Tryckverkan

Utifrån storleksordningen på den mängd fordonsgas som har en koncentration övre undre brännbarhetsgränsen kan explosionstrycket och förbränningsvågens längd beräknas grovt.

Beräkningar för tryckverkan har genomförts för ett medelstort utsläpp av fordonsgas. Ett sådant utsläpp har beräknats till 5 kg fordonsgas i en volym på 250 m³. Detta motsvarar en gaskoncentration av c:a 3 vol% vilket är under brännbarhetsgränsen. Det medför att det beräknade trycket är en mycket konservativ skattning.

Tryckverkan från ett medelstort utsläpp har beräknats till ett tryck upp till ca 10 kPa, 0,1 bar.

Flammorna från en explosion i ett medelstort utsläpp beräknas nå ca 7 meter från gasmolnets centrum.

9.6.2 Jetflamma

Beräkningar för jetflamma har inte genomförts för detta scenario men eftersom utflödet är likvärdigt med det för medelstort hål på högtryckssidan så används de resultaten.

Det ger att brandeffekten är 3,5 MW och flamlängden är 3,6 meter.

Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 18 meter i flammans längsriktning och 3,5 meter i sidled från flammen.

I längdled anges det konvektiva riskavståndet. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. Det konvektiva riskavståndet satts till c:a 5*flamlängden.

9.7 Medelstort hål på lågtrycksledning

Beräkningar har genomförts för ett läckage från ett medelstort hål (1,9 mm) på lågtrycksledningen (10 bar). Gasflödet beräknas till 0,005 kg/s initialt.

Direkt antändning av utsläppet leder initialt till en jetflamma med en brandeffekt som beräknats till ca 250 kW.

9.7.1 Explosionsberäkning

Tryckberäkningar för gaskoncentrationen i ett gasmoln från ett utsläpp från ett medelstort hål har inte genomförts eftersom spridningsberäkningarna för ett stort hål visar att undre brännbarhetsgränsen inte uppnås. Eftersom utflödet av gas är mycket mindre vid ett medelstort hål än för ett stort hål görs bedömningen att undre brännbarhetsgränsen inte uppnås för ett medelstort hål.

9.7.2 Jetflamma

Flamlängden har beräknats till 0,9 meter initialt.

Strålningsberäkningarna har utförts med en emissivitet på 0,2. Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra

gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 5 meter i flammans längsriktning och 0,9 meter i sidled från flammen.

I längdled anges det konvektiva riskavståndet. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. Det konvektiva riskavståndet satts till c:a 5*flamlängden.

9.8 Litet hål på lågtrycksledning

Beräkningar har genomförts för ett läckage från ett litet hål (0,75 mm) på lågtrycksledningen (10 bar). Gasflödet beräknas till 0,0008 kg/s initialt.

Direkt antändning av utsläppet leder initialt till en jetflamma med en brandeffekt som beräknats till ca 40 kW.

9.8.1 Explosionsberäkningar

Tryckberäkningar för gaskoncentrationen i ett gasmoln från ett utsläpp från ett litet hål har inte genomförts eftersom spridningsberäkningarna för större hål visar att undre brännbarhetsgränsen inte uppnås.

9.8.2 Jetflamma

Flamlängden har beräknats till 0,4 meter initialt.

Strålningsberäkningarna har utförts med en emissivitet på 0,2. Avståndet till den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador har ansatts till 4 kW/m²) under utrymning är initialt upp till 2 meter i flammans längsriktning och 0,4 meter i sidled från flammen.

I längdled anges det konvektiva riskavståndet. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. Det konvektiva riskavståndet satts till c:a 5*flamlängden.

9.9 Konsekvensberäkningar – CFD simuleringar

I genomförd litteraturstudie har ingen dokumentation avseende hur fordonsgas sprids samt hur förväntade konsekvenser kommer se ut påträffats. Slussens bussterminal är unik avseende att den ligger under mark samt att den kommer att trafikeras av bussar som drivs av fordonsgas. De genomförda handberäkningar kan betecknas som grov varpå behov på CFD-simuleringar har genomförts med FLACS, se även bilaga 5. Beräkningarna har genomförts av företaget GexCon och rapporten är på engelska.

Syftet med beräkningarna är att på ett mer noggrant sätt analysera utsläpp, spridning, fördröjd antändning och explosionslaster i form av tryckuppbyggnad.

CFD-beräkningar har genomförts för två läckagestorlekar, 6 mm och 2 mm båda läckagen sker på högtryckssidan av bränslesystemet d.v.s. initiala trycket är 15 MPa, 150 bar. Hänsyn har tagits till anläggningens ventilationsförhållanden och geometri, den sistnämnda med en förenklad geometri då denna typ av beräkningar är komplicerade och omfattande. Förenklingen bedöms dock inte menligt påverka resultatet, och den beaktas i analysen då slutsatser av resultatet dras.

Ventilationsförhållandena varierades på en hög och en låg ventilationshastighet.

9.9.1 Medelstort hål på högtrycksledning 2 mm

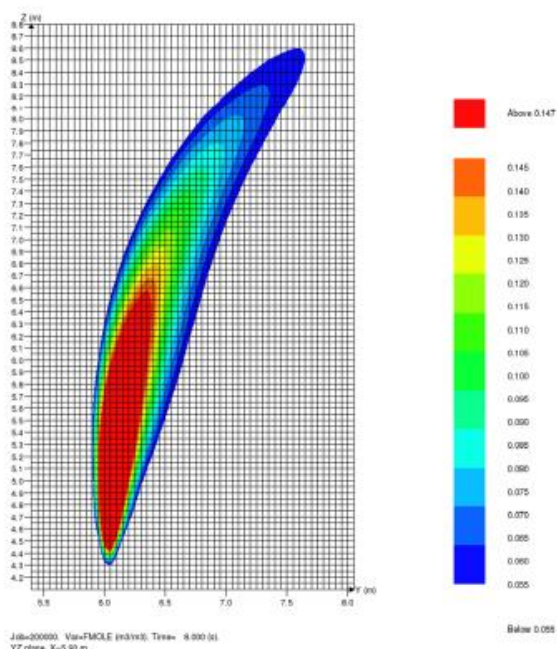
Beräkningarna genomfördes för ett läckage från ett hål på 2 mm i högtrycksledningen 15 MPa, (150 bar). Gasflödet initiala värde var 82 g/s avklingandes till 80 g/s efter 60 s.

Spridningsberäkningarna för ett medelstort hål på högtrycksledningen visar mycket liten mängd gas inom brännbarhetsgränserna, d.v.s. om en explosion skulle inträffa blir tryckupbyggnaden försumbar.

9.9.2 Stort hål (rörbrott) på högtrycksledning samt läckage smältsäkring

Beräkningarna genomfördes för ett läckage från ett hål på 6 mm i högtrycksledningen 15 MPa, (150 bar). Gasflödet initiala värde var 741 g/s avklingandes till 570 g/s efter 60 s.

Spridningsberäkningarna för båda ventilationsförhållandena visar på en liten mängd ansamlad gas inom brännbarhetsområdet ca 18 g gas, vilket ger en brännbar blandning på ca 90 l. GexCon menar att det är den hastighet som driver ut gasen ur hålet som är styrande för spridningsförhållandet. En känslighetsanalys har genomförts på beräkningsdomänens grid som visar på i storleksordning likanade resultat. Spridningsberäkningen ger ett moln på ca 4 m längd. Se Figur 8 nedan.



Figur 8 Gasmolnets utbredning och koncentration vid ett utsläpp genom ett 6 mm hål och ett utflöde på 790 g/s vid 15 MPa tryck.

9.9.3 Explosionsberäkningar

Två explosionsberäkningar har utförts med CFD-programmet FLACS, den ena motsvarar den utsläppta mängd gas som simulerats fram vid stort hål ca 100 g gas, vilket motsvarar ett gasmoln på ca 1 m³, den andra utgör ett gasmoln med 10 kg gas vilket motsvara ett gasmoln på 175 m³ (7x5x5 m).

Resultatet av beräkningarna visar att molnet med 100 g gas ger mycket små tryckökningar utan någon större påverkan på omgivningen, mindre än 0,5 kPa (5 mbar).

Det större gasmolnet med 10 kg gas ger ett maximalt tryck på ca 13 kPa i den zon som förbränningen sker d.v.s. i närhet av bussarna. Utanför denna zon faller trycket till i storleksordning 8-10 kPa med en impuls på ca 250 ms och är konstant över hela terminalens sträckning, se även Bilaga 5.

9.10 Beräkningar av dimensionerande tryck

I nedanstående kapitel beskrivs beräkningarna som har genomförts för att bestämma det dimensionerande trycket avseende explosion vid utsläpp av fordonsgas i bussterminalen. Det dimensionerande trycket har använts för att dimensionera den avskiljande konstruktionen mellan vänthall och bussköryta samt beräkna konsekvensavstånd för människor med avseende på tryck.

I analysen har både handberäkningar och CFD beräkningarna genomförts avseende spridning av gas, dispersionsberäkningarna. Beräkningarna syftar till att bedöma hur stor mängd gas inom brännbarhetsområdet som ansamlas vid ett utsläpp. Vid en fördröjd antändning kan då en gasmolnsexplosion alstra ett övertryck som påverkar konstruktion och personer inom konsekvensområdet för explosionen.

Det råder stora osäkerheter i båda beräkningsmodellerna vilka redogörs av professor Göran Holmstedt Lunds tekniska högskola, Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 4 [34]. Den ackumulerade massan metan bedöms överskattas med en faktor 10 under förutsättning att CFD simuleringarna av hastighetsfältet stämmer.

Tillika bedöms den genomförda CFD-analysen underskatta gasmolnet. I Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 4 [34] uppmärksammas en rad osäkerheter i CFD FLACS simuleringarna. Hur pass stora osäkerheterna är i CDF-simuleringarna är svåra att avgöra och simuleringarna bör valideras mot experiment som är liknande aktuella förutsättningar.

Med stora osäkerheter i resultaten för både handberäkningar och CFD beräkningar har fortsatta beräkningar genomförts utifrån en bedömd trolig ansamlad mängd gas. I handberäkningarna har det räknats fram att det beroende på hur mycket som ventileras bort kan ansamlas 40-100 kg fordonsgas i en volym som är 1000 m³ stor. Om volymen är mindre så ansamlas mindre och vice versa. Det är viktigt att påpeka att all ansamlad gas inte kommer att ligga inom brännbarhetsområdet. I denna analys görs antagandet med en överskattning av resultatet med ca en faktor 10 d.v.s. 40-100 kg gas bör snarare vara i storleksordningen 4-10 kg gas vid ett stort utsläpp 6 mm hål högtrycksidan.

På grund av ovanstående osäkerheter bedöms grovt att dimensionerande tryck från ett gasutsläpp med stort hål 6 mm på högtrycksidan (15 MPa) ger ett gasmoln som maximalt skapar 10 kg ansamlad gas. Beräkningar av tryckvågen för en explosion med 10 kg ansamlad gas ger att övertrycket vid det avskiljande partiet mot vänthallen är ca 10 kPa med en impuls på 250 ms.

Givet att FLACS simuleringarna är rimliga understiger troligtvis den ansamlade mängden gas 1 kg vilket resulterar i en tryckvåg klart under 10 kPa. För att säkerställa dimensionerande tryck föreslås att experimentella försök genomförs.

10 Konsekvensuppskattningar påverkan på människor

I detta avsnitt redovisas konsekvensuppskattningar i form av antal omkomna i respektive scenario som behövs för att beräkna förväntat antal omkomna med hjälp av händelseträdsmodellen. För varje slutscenario i händelseträdsmodellen görs en konsekvensuppskattning i form av antal omkomna eller svårt skadade. Bedömningarna av antalet omkomna baseras på de konsekvensberäkningar som genomförts, se kap 9 och 9.9, litteraturstudier samt erfarenhet från tidigare utredningar. Skattningar görs avseende troligt värde samt för troligt min och troligt max. Skattningarna avseende troligt värde utgör basbedömningarna som används för att beskriva risknivån, bedömningarna för troligt, min och max används inom ramen för osäkerhetsanalys avseende konsekvensuppskattningar, se avsnitt 12.

10.1 Skadekriterier

10.1.1 Kritiskt tryck

Den påverkan som kan uppkomma på människor till följd av tryckvågor kan delas in i direkta och indirekta skador. Vanliga direkta skador är spräckt trumhinna eller lungskador. De indirekta skadorna kan uppstå antingen då människor kastas iväg av explosionen (tertiära), eller då föremål (splitter) kastas mot människor (sekundära) [18].

Sannolikheten för en individ att träffas av splitter är låg, och antalet omkomna till följd av splitterverkan bedöms därför bli litet. Sammantaget bedöms riskbidraget från splitterverkan vara försumbart. Vad gäller trycknivåer, och de direkta skador som de ger upphov till, går gränsen för lungskador vid omkring 70 kPa och direkt dödliga skador kan uppkomma vid 180 kPa [19]. Dessa värden avser dock direkt tryckpåverkan, mot vilken den mänskliga kroppen är relativt tålig. Tertiära skador (då människor kastas iväg av explosionen) bedöms leda till dödsfall vid betydligt lägre tryck än 180 kPa. Byggnader har normalt en relativt låg trycktålighet, och skadas svårt eller rasar vid tryck på 15-40 kPa. 20 kPa bedöms vara ett representativt medelvärde för när byggnader skadas.

Samttaget bedöms det lämpligt att dela upp konsekvensberäkningarna i två zoner, med hänsyn till de stora skillnaderna i trycknivåer som kan leda till dödlig påverkan, beroende på vilken effekt som studeras. Följande antaganden har gjorts vad gäller konsekvenserna:

- Inom det område där trycket överstiger 180 kPa antas 100 % av personerna omkomma.
- Inom det område där trycket hamnar i intervallet 20-180 kPa antas baserat på ovan att 30 % av personerna omkommer.

10.1.2 Kritisk strålning

Kritisk nivå för strålning mot människor har ansatts till 4 kW/m² till skillnad från genomförda utrymningsberäkningar där kritisk nivå ansatts till 2,5 kW/m². Anledningen till att det finns en skillnad mellan de olika analyserna är att det är olika konsekvenser samt olika tidsspann som studeras. 4 kW/m² motsvarar den nivå då strålningsintensiteten från en flamma kan komma att påverka människor kritiskt (risk för andra gradens brännskador efter 20 sekunders påverkan) [20].

Inom det beräknade riskområdet till strålningsnivån 4 kW/m² antas 30 % av antalet påverka personer omkomma. Det antas att endast en andel av personerna inom beräknat område omkommer av strålningsintensiteten då den kritiska nivån är konservativt antagen. Nära strålningskällan är troligtvis andelen högre medan den är lägre längre bort. Antagandet bedöms som ett troligt medelvärde.

10.2 Personantal

Personantalet i bussterminalen beror på tidpunkt på dygnet. I analysen delas personbelastningen in i tre olika nivåer högtrafik, lågtrafik och nattrafik. För respektive trafiksituation ansätts ett minsta, ett maximalt samt ett troligt antal människor som befinner sig i de olika delarna i bussterminalen.

För platserna infartstunnel, avstigning, reglering, kröken och påstigning ansätts antalet personer utifrån en uppskattning om hur många personer som kan finna sig i bussarna. En buss antas rymma maximalt 75 personer. Vid reglering och i kröken antas bussarna endast rymma en förare.

I vänthallen har antalet personer ansatts enligt beräknad mängd personer som skall passera genom bussterminalen. Antalet personer antas vara följande utifrån trafiksituation [31] :

Tabell 3. Antal personer i vänthallen beroende på trafiksituation.

	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Personantal	1000	5000	2500	500	3000	1500	0	1500	500

10.3 Grundläggande antaganden

Bedömning av konsekvenser sker mot bakgrund av följande förutsättningar och antaganden:

- Vänthallen utförs med ett avskiljande parti som står emot de tryckökningar som beräknas uppkomma. Dimensionerande tryck anges i kapitel 9.10.
- Risk föreligger för att personer i vänthallen påverkas av att dörrar mellan vänthallen och busskörtytan står öppna eller att splitter eller fragment tar sig genom avskiljningen mot vänthallen. Dessa personer bedöms innefattas i det antagande om att personer inte har hunnit ta sig ifrån busskörtytan.
- Vid beräkning av antalet personer som påverkas av ett olycksscenario görs detta utifrån hur många bussar som påverkas och hur många personer som kan finna sig i bussarna. Att det kan finnas personer som befinner sig utanför bussarna antas kompenseras med att bussarna är fulla med människor och ingen har lämnat busskörtytan och gått in i vänthallen. Övriga personer i anläggningen bedöms kunna utrymma obehindrat.
- Vid brand i buss antas personer ha börjat utrymma och konsekvensen av en kärlsprängning och fördröjd antändning vid utsläpp från smältsäkring reduceras med 50 %. Detta antagande görs oavsett fungerande detektionssystem eftersom personer inte kan vistas för nära den brinnande bussen p.g.a. strålning från branden.
- Jetflamma som uppkommer då en buss redan brinner antas inte föranleda några ytterligare konsekvenser för personer i busskörtytan (med reservation för utvalda teknikutrymmen). Anledningen är att jetflamman uppkommer en tid in i brandförloppet och utrymningen redan har pågått en stund eller till och med avslutats. Dessutom brinner en buss och strålning från bussbranden medför att personer inte kan vistas nära bussen.
- Brand som släcks i tidigt skede antas inte utgöra ett hot mot människor i anläggningen och föranleder därmed inga omkomna.
- Jetflamma som är uppåtriktad antas inte leda till några omkomna.

- Jetflamma antas endast påverka personer vid av- och påstigning, då det är på dessa platser människor vistas utanför bussarna i busskörytan.
- Konsekvenser på personer antas ske i början av olycksförloppet dvs de 10 första minuterna.

10.4 Konsekvensuppskattning för brand i buss

10.4.1 Infartstunnel

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom utrymning redan påbörjats i samband med branden.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 1 buss påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 4. Skattning av antal omkomna personer vid brand i buss i infartstunneln.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	6	2	0	6	1	0	6	1
Utsläpp säkring explosion	0	6	2	0	6	1	0	6	1

10.4.2 Avstigning

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom utrymning redan påbörjats i samband med branden.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 2 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 5. Skattning av antal omkomna personer vid brand i buss vid avstigningen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	11	4	0	11	3	0	11	2
Utsläpp säkring explosion	0	6	2	0	6	1	0	6	1

10.4.3 Reglering

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom utrymning redan påbörjats i samband med branden.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 5 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 1 bussförare per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 6. Skattning av antal omkomna personer vid brand i buss vid regleringen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	2	1	0	2	1	0	2	1
Utsläpp säkring explosion	0	2	1	0	2	1	0	2	1

10.4.4 Kröken

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom utrymning redan påbörjats i samband med branden.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 1 buss påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är bussförare och eventuellt någon som följer med.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 7. Skattning av antal omkomna personer vid brand i buss i kröken.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	2	1	0	2	1	0	2	1
Utsläpp säkring explosion	0	2	1	0	2	1	0	2	1

10.4.5 Påstigning

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom utrymning redan påbörjats i samband med branden.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 5 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 8. Skattning av antal omkomna personer vid brand i buss vid påstigningen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	2	28	9	1	28	7	0	28	5
Utsläpp säkring explosion	1	11	4	0	11	3	0	11	2

10.5 Konsekvensuppskattning vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet

10.5.1 Infartstunnel

Då detektionssystemet fungerar antas utrymning påbörjas och antalet omkomna reduceras med 50 % för scenarion med fördröjd antändning.

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom det inte vistas några människor på denna yta.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 1 buss påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 9. Skattning av antal omkomna personer vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet i infartstunneln.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Käralsprängning	9	23	18	5	23	14	0	23	9
Stort hål explosion	9	23	18	5	23	14	0	23	9
Utsläpp säkring explosion	9	23	18	5	23	14	0	23	9

10.5.2 Avstigning

Då detektionssystemet fungerar antas utrymning påbörjas och antalet omkomna reduceras med 50 % för scenarion med fördröjd antändning jämfört med scenariot då detektionssystemet inte fungerar.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 2 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 10. Skattning av antal omkomna personer vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet vid avstigningen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Käralsprängning	18	45	36	9	45	27	0	45	18
Stort hål explosion	9	23	18	5	23	14	0	23	9
Stort hål jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2
Medelstort hål jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2
Utsläpp säkring explosion	9	23	18	5	23	14	0	23	9
Utsläpp säkring jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2

10.5.3 Reglering

Då detektionssystemet fungerar antas utrymning påbörjas och antalet omkomna reduceras med 50 % för scenarion med fördröjd antändning.

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom det inte vistas några människor i denna yta.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 5 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 1 bussförare per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 11. Skattning av antal omkomna personer vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet vid regleringen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	5	2	0	5	2	0	5	2
Stort hål explosion	0	5	2	0	5	2	0	5	2
Utsläpp säkring explosion	0	5	2	0	5	2	0	5	2

10.5.4 Kröken

Då detektionssystemet fungerar antas utrymning påbörjas och antalet omkomna reduceras med 50 % för scenarion med fördröjd antändning.

Jetflamma bedöms inte leda till några omkomna eftersom det inte vistas några människor i denna yta.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 1 buss påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är bussförare och eventuellt någon som följer med.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 12. Skattning av antal omkomna personer vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet i kröken.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	0	5	2	0	5	2	0	5	2
Stort hål explosion	0	5	2	0	5	2	0	5	2
Utsläpp säkring explosion	0	5	2	0	5	2	0	5	2

10.5.5 Påstigning

Då detektionssystemet fungerar antas utrymning påbörjas och antalet omkomna reduceras med 50 % för scenarion med fördröjd antändning.

En jetflamma antas påverka personer som kan befinna sig direkt i flammans riktning d.v.s. personer som befinner sig mellan bussarna och vänthallen.

Vid utsläpp av fordonsgas och fördröjd antändning samt för kärlsprängning antas 5 bussar påverkas av olyckan. Maximalt antal personer som påverkas av dessa scenarion är 75 personer per buss.

Tabellen nedan anger max, min och troligt antal omkomna.

Tabell 13. Skattning av antal omkomna personer vid tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet vid påstigningen.

Scenario	Högtrafik			Lågtrafik			Nattrafik		
	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig	Min	Max	Trolig
Kärlsprängning	45	113	90	23	113	68	0	113	45
Stort hål explosion	18	45	36	9	45	27	0	45	18
Stort hål jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2
Medelstort hål jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2
Utsläpp säkring explosion	18	45	36	9	45	27	0	45	18
Utsläpp säkring jetflamma	0	10	5	0	10	5	0	5	2

11 Beräknad risk

I detta kapitel redovisas resultatet av riskanalysen. Resultaten anges i form av samhällsrisk, både med förväntat antal omkomna och med F/N-kurva (F=frekvens, N=antal döda).

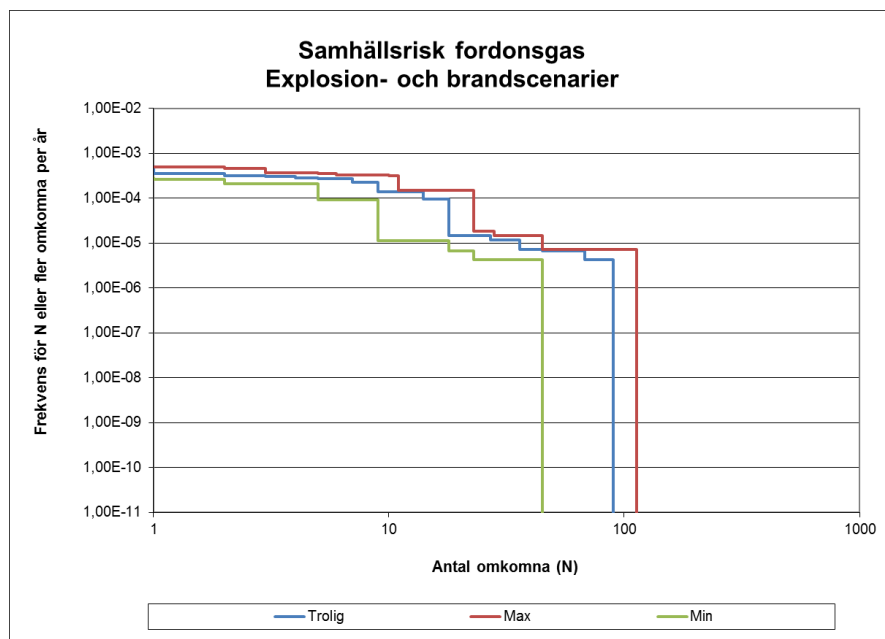
I känslighets- och osäkerhetsanalysen, se kapitel 12, diskuteras hur de osäkerheter och variationer som finns i riskanalysen påverkar de väntevärden som analysen resulterat i.

Tabell 14. Aktivitetsbaserade riskmåttet, förväntat antal omkomna per år i bussterminalen p.g.a. olycka med fordonsgasdrivna bussar, medelvärde av min, max och trolig.

Olyckskategori	Förväntat antal olyckor/år	År mellan olyckor	Förväntat antal döda/år	Antal år mellan dödsolycka* (år)
Brand				
Kärlsprängning			5,39E-05	18546
Utsläpp/explosion			2,46E-04	4064
Delfrekvens - brand	7,48E-02	13,36	0,0003	3334
Tekniskt fel på utrustning i bränslesystemet				
Kärlsprängning			7,5E-04	1325
Utsläpp/explosion			3,14E-03	319
Utsläpp/jetflamma			1,52E-06	65607
Delfrekvens - Tekniskt fel	2,05E-02	48,79		
Total			4,51E-03	222

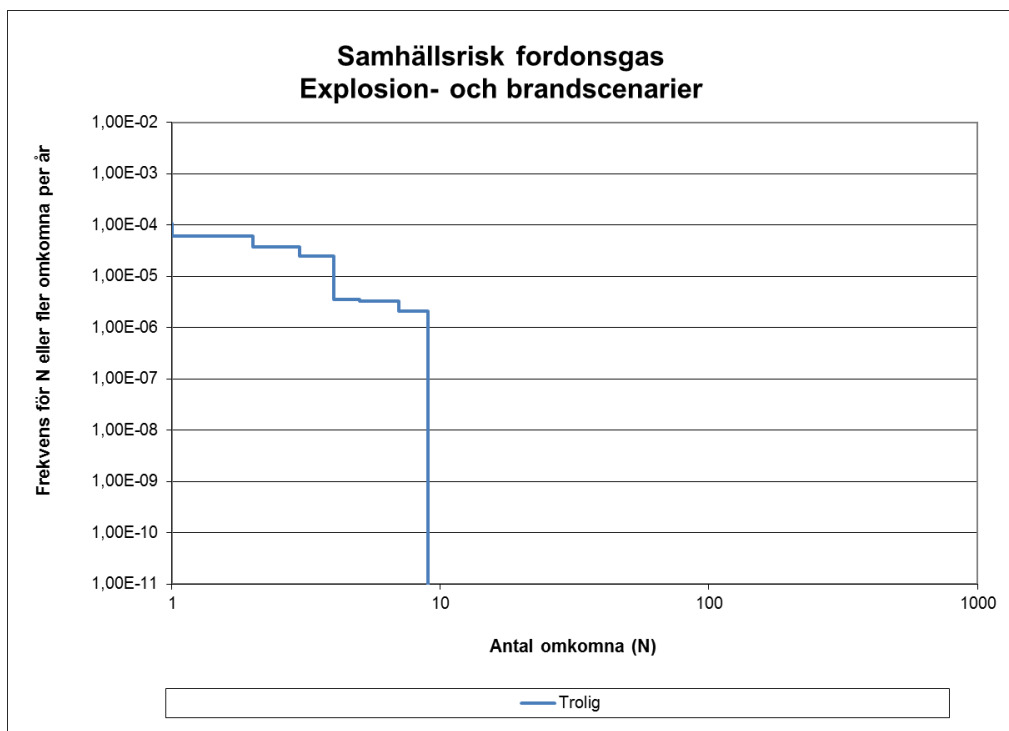
*redovisar medelvärdet för en omkommen person, beräknat på förväntat antal döda per år.

Av ovanstående, Tabell 14, kan aktivitetsbaserade riskmåttet (individriska) utläsas medelvärden för på antal döda per år, d.v.s. den analyserade olyckorna har fördelats ut över tiden, vilken utgör den individrisk som föreligger för personer i anläggningen. Frekvenserna avseende antal år emellan dödsolycka utgör ett förväntat värde men och ska inte tolkas som år mellan olyckor utan snarare är den sannolikheten som är relevant d.v.s. en olycka kan inträffa redan dagen anläggningen tas i drift med en viss sannolikhet.



Figur 9. Samhällsrisk beskriven som F/N-kurva för busskörtyta och vänthall. Observera att den endast avser olyckor med fordonsgas.

Redovisad risknivå för Slussens bussterminal avseende bussar som drivs med fordonsgas omfattar olycksrisker inom ett stort spektrum av olyckor med varierande allvarlighetsgrad där vissa har potentiellt stora konsekvenser, ca 100 omkomna, se Figur 9. Dessa konsekvenser beror till stor del av konsekvenser som skapas momentant när delar i bränslesystemets ingående delar av olika anledningar fallerar/fel fungerar eller brister, t.ex. så kallad kärlsprängning. Dessa konsekvenser beror inte helt på att anläggningen ligger under mark utan motsvarande olyckor kan inträffa i anläggningar ovan mark och även utomhus. Figur 10 nedan redovisar riskbidraget från de konsekvenser som bedöms endast uppkomma på grund av att anläggningen placeras under mark d.v.s. detta kan ses som en relativ jämförelse mot en bussterminal ovan mark. Observera att någon riskanalys för en ytförlagd bussterminal är inte genomförd så jämförelsen är en grov uppskattning. Ur figuren kan det utläsas att det framförallt är scenarier med färre antal påverkade personer som kan härröras till att terminalen placeras under mark.



Figur 10. Riskbidraget med avseende konsekvenser som bedöms uppkomma på grund av att bussterminalen placeras under mark.

12 Osäkerheter och känslighetsanalys

I detta kapitel diskuteras vald analysmetod och osäkerheter som förknippas med riskanalysen. Det är viktigt att beskriva osäkerheter då riskanalysen avser utgöra ett beslutsunderlag. I kapitlet redovisas en övergripande beskrivning av osäkerheterna och en kvantitativ osäkerhets- och känslighetsanalys avseende ingående parametrar.

De antaganden som har gjorts i analysen har varit av konservativt karaktär så att risknivån inte ska underskattas.

12.1 Vald analysmetod

Alla riskanalyser, oavsett metodik, är förenade med osäkerheter och begränsningar [21]. De antaganden och förenklningar som införs i en riskanalys är behäftade med osäkerhet. Många osäkerheter förs in redan vid val av metod, definition av syfte och avgränsningar samt val av detaljeringsgrad. Denna riskanalys utgör inget undantag.

Händelseträdsmetodik utgör grunden för de kvantifieringar av risknivån som utförs. Händelseträdsmetodiken är ett verktyg för att på ett systematiskt sätt ta fram och illustrera olycksscenarier och deras samband. Händelseträdsmetodik ger dock i sig ett begränsat stöd och bygger i hög grad på utförarens kunskaper.

I riskanalysen kvantifieras frekvenser och sannolikheter samt konsekvenser för händelser som kan inträffa i Slussens bussterminal som är kopplade till bussar som drivs med fordonsgas. Händelserna är av olika karaktär, dels finns de scenarier som förväntas ske relativt sällan (eller i praktiken inte alls), men att de i värsta fall kan leda till allvarliga eller till och med extremt allvarliga konsekvenser och dels finns de som förväntas inträffa relativt ofta men istället har betydligt lindrigare konsekvenser. Analyser av händelser med den förstnämnda karaktäristiken är alltid behäftade med stora osäkerheter vad avser uppskattning av framför allt förväntad frekvens, men också förväntad konsekvens. Vidare bör beaktas att denna riskanalys behandlar olyckshändelser som styrs av händelsekedjor och förlopp som kan vara mycket svåra att prediktera och som i mångt och mycket, och i praktiken, styrs av tillfälligheter, exempelvis hur enskilda busschaufförers beteende eller hur ledningsfunktionens operatör handlar. Även om det med hjälp av händelseträden försöks ta hänsyn till ett stort antal olika scenarier, finns det ingen möjlighet att täcka in *samtliga*. Således beskriver även omfattande händelseträd en grovt förenklad bild av verkligheten

Sammantaget betyder detta att denna riskanalys är behäftad med många och relativt stora osäkerhetsfaktorer. Detta kan sägas vara en naturlig följd av att det i riskanalysen beskrivs en framtida riskbild för en icke existerande anläggning baserat på dagens kunskap och historiska data. Studerat anläggning är så unikt att ett relevant statistiskt underlag saknas i flera avseenden. Användning av fordonsgas som drivmedel har därtill inte funnit speciellt länge varvid relevant olycksstatistik saknas.

12.2 Osäkerheter i kvantitativ riskanalys

Osäkerheter i kvantitativa riskanalyser kan enligt ”Uncertainty in Quantitative Risk Analysis” [22] i allmänhet hänföras till två fundamentala kategorier; stokastiska osäkerheter (icke reducerbara) eller kunskapsbaserade osäkerheter (reducerbara). I denna analys finns båda kategorierna representerade. Följande indelning av osäkerheter är i praktiken mer användbar:

- Modellosäkerheter
- Fullständighetsosäkerheter
- Parametersäkerheter

Modellosäkerheter uppkommer till följd av att en modell, konceptuell eller matematisk, oundvikligen är en förenkling av verkligheten [22]. I denna riskanalys används ett flertal specifika modeller för kvantifiering av frekvenser och konsekvenser. Modellerna avser beskriva verkligheten i erforderlig utsträckning. De modeller som används utgör verktyg för att på ett systematiskt och transparent sätt få en uppfattning om risknivåerna och skall inte betraktas leda till annat än fingervisare om storleken på frekvenser och konsekvenser. Modellerna bedöms, trots att de vardera är att betrakta som grova, kunna ge en bra bild av hur ett verkligt förlopp ter sig. Det bör poängteras att varje modell i sig själv förknippas med ett antal antaganden. Schablonmodeller har använts vid flera frekvensberäkningar, vilket gör att de osäkerheter som finns i dessa kommer också att finnas med i denna riskanalys. Det statistiska underlaget som modellerna bygger på är förknippat med osäkerheter. Vad gäller händelseträdsmodellen bör nämnas att den är framtagen för denna analys och inte utgör någon verifierad modell.

Även en modell som korrekt beskriver de förhållanden den innefattar kan innehålla **fullständighetsosäkerheter**, det vill säga osäkerheter till följd av att modellen inte innehåller all relevant information [22]. Denna analys söker ta hänsyn till i princip hela spektret av konsekvenser av brand- och explosionsolyckor i Slussens bussterminal avseende olyckor förknippade med fordonsgas. Antalet variationer på olycksscenarierna kan dock betraktas som oändliga, vilket gör att analysen måste begränsas till ett antal specifika scenarier som skall representera alla de händelser som kan inträffa. Trots fullständighetsosäkerheter i använda modeller bedöms de kunna leda till ett tillräckligt gott beslutsunderlag för syftet med analysen.

Parameterosäkerheter uppkommer till följd av att indata som används i beräkningarna är behäftade med osäkerheter [22]. Osäkerheterna kan ha sin grund i att det studerade fenomenet innehåller naturlig variation (icke reducerbara, stokastiska osäkerheter) eller för att de verkliga värdena helt enkelt inte är kända (reducerbara kunskapsosäkerheter). I utförd analys finns osäkerheter som kan hänföras till båda dessa kategorier av osäkerheter. Det har gjorts flera antaganden, ibland mycket grova, där det saknats fakta om olika faktorerers frekvenser etc. Den statistik som finns gällande fel frekvenser på tryckkärl, rörledningar och ventiler mm är förknippade med osäkerheter. I denna analys har statistiska uppgifter använts, det vill säga uppgifter som redogör för en historisk situation, för att skatta framtida situation som också innehåller naturlig variation.

Utöver nämnda osäkerhetskategorier har ett antal specifika antaganden och avgränsningar införts i konsekvensanalysen. Bland annat antas att personer som befinner sig i bussterminalen vid en olycka har ett beteende som antas vara rationellt ur ett tekniskt perspektiv, d.v.s. reagerar på fara genom att direkt utrymma etc. Dessa bidrar också till den totala osäkerheten.

Att kvantitativa riskanalyser till stor del grundar sig på bedömningar och grova skattningar måste tas hänsyn till vid beaktande av de resultat och slutsatser som presenteras.

12.3 Riskanalysens berättigande

Riskanalys är inte den exakta vetenskap som det vid första anblicken kan ge sken av[25]. Brist på relevanta data, behov av att göra antaganden och förenklingar, svårigheter att få fram tillförlitliga uppgifter samt mer eller mindre osäkra skattningar, som ibland bygger på varandra i flera led, tycks vara regel snarare än undantag. Detta är dock på inget sätt unikt för den aktuella analysen. Dessa svårigheter innebär också att olika riskanalyser/riskanalytiker ibland kan komma fram till motstridiga resultat p.g.a. skillnader i antaganden, metoder och/eller ingångsdata.

Varför skall det då spenderas tid och pengar på att genomföra riskanalyser om de nu är behäftade med problem som gör att de inte kan ge svar på alla frågor om riskerna i analysen? Det finns flera skäl till att systematiska riskanalyser är att föredra framför andra mer informella/intuitiva sätt att hantera den kunskapsmassa som finns beträffande risker med fordonsgasdrivna bussar.

Användningen av riskanalysmetoder av den typ som tagits fram i denna analys innebär att befintlig kunskap insamlas/struktureras/sammanställs på ett systematiskt sätt och att kunskapsluckor kan

identifieras. Det medför i sin tur att analysens förutsättningar kan provas/ifrågasättas/korrigeras av oberoende analytiker/forskare/experty och att angelägna forskningsområden kan formuleras.

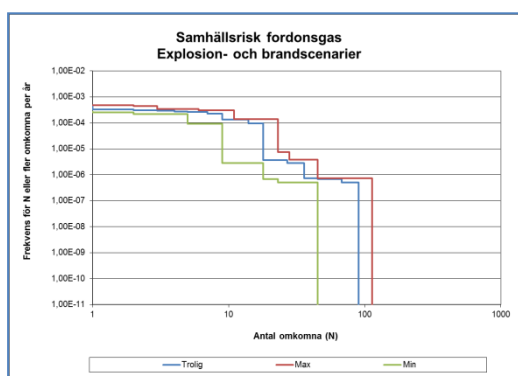
En annan kanske ännu viktigare fördel med att genomföra riskanalyser är att de antaganden och värderingar som ligger till grund för olika riskuppskattningar tydliggörs. Det innebär att det bör bli lättare att undvika onödiga missförstånd vid information/diskussion/förhandling mellan beslutsfattare/transportörer/allmänhet. Riskanalyser utgör därigenom ett viktigt led i den demokratiska process som omger hantering av risker i olika projekt i samhället.

12.4 Känslighetsanalys avseende frekvensuppskattningar

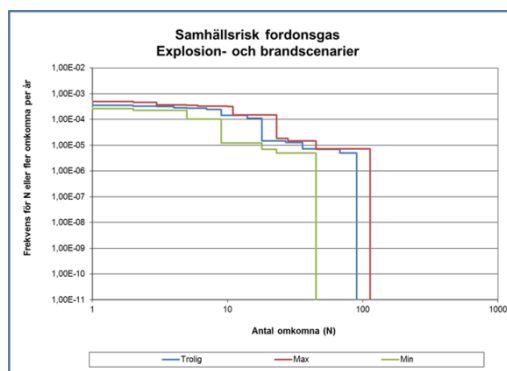
Analysen visar tydligt att osäkerheter avseende det förväntade antalet tekniska fel på fordonsgasdrivna bussarnas bränslesystem har ett signifikant bidrag till samhällsrisk, medan osäkerheten i övriga parametervärden bedöms inverkar i relativt liten utsträckning på resultatet. Orsaken till att tekniska fel som leder till utsläpp av gas påverka resultatet stort är att denna typ av olyckor inte ger någon förvarning utan resulterar i en explosion eller en jetflamma momentant.

Nedan redovisas de parametrar som har identifierats som relevanta för känslighetsanalysen och ger störst påverkan på resultatet:

Felfrekvens på gasflaskor, enligt [13] har trycksatta kärl en felfrekvens på $5,0E-07$ per flaska och år. Detta ger för aktuell anläggning en sannolikhet avseende del av utrustning som påverkas avseende flaska på 0,1 %. Denna parameter påverkar resultatet signifikant. Detta åskådliggörs i nedanstående figurer där frekvensen för 30 eller fler omkomna är en tiopotens lägre om sannolikheten för kärlsprängning är 0,01 % istället för 0,1 %.

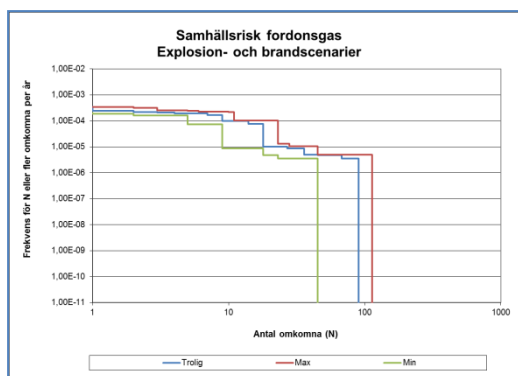


Figur 11. Samhällsrisk med 0,01 % sannolikhet för kärlsprängning. Parametern styr signifikant risken för allvarliga olyckor.

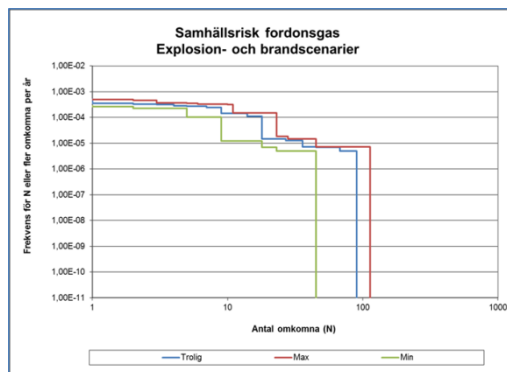


Figur 12. Samhällsrisk med 0,1 % sannolikhet för kärlsprängning.

Antal fordon som drivs med fordonsgas i driftskedet är i analysen antaget till 100 %.



Figur 13 Samhällsrisk med en bussflotta som består av 70 % fordonsgasdrivna bussar. Minskar risknivån med 30 %.



Figur 14 Samhällsrisk med en bussflotta som består av 100 % fordonsgasdrivna bussar.

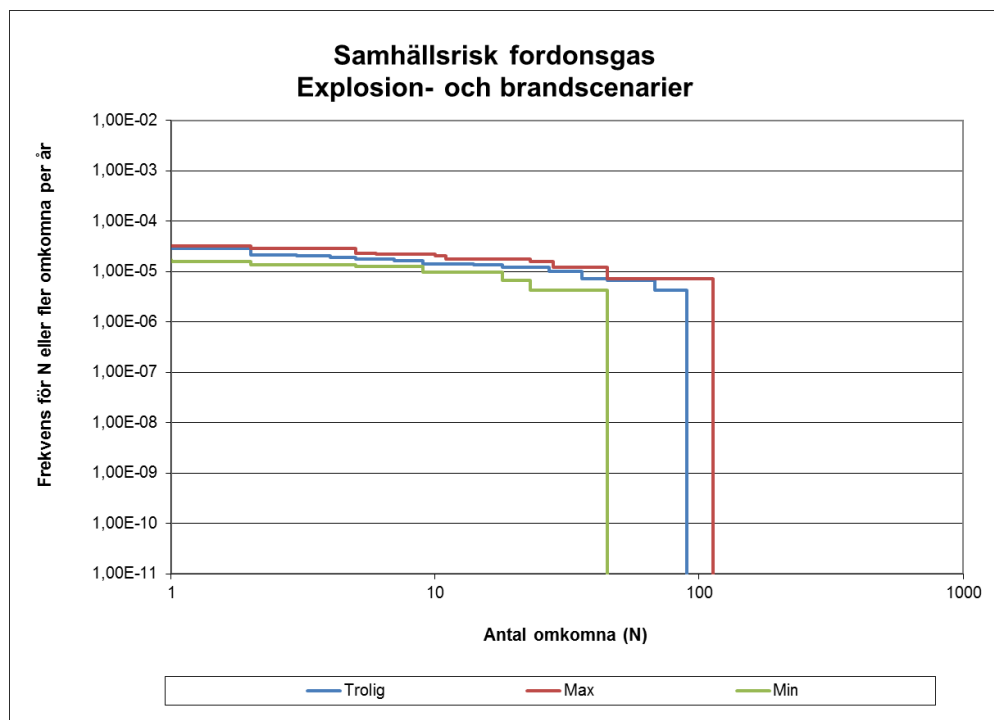
Antal personer som påverkas har i analysen antagits till 30 % för valt kritiskt tryck och strålning. Förändringar av parametern påverka resultatet signifikant. En ökning av parametern till 40 % ger en riskökning på 32 % och en minskning till 20 % en riskminskning med 32 %.

Branden släcks manuellt av person på plats har antagits till 70 % i enlighet med finsk statistik. Om antagandet ändras till 50 % ökar risknivån med ca 9 %.

Det har i genomförd analys antagits att bussarna är utrustade med släcksystem i motorutrymmet och att detta reducera antal bränder med 50 %. Om bussarna inte är utrustade med släcksystem i motorutrymmet ökar risknivån med ca 4 % respektive om effektiviteten är 100 % minskar risknivån med 4 %.

Detektionssystemet har antagits ha en hög tillförlitlighet på 98 %, om detektionssystemet tillförlitlighet minskas till 80 % ökar risknivån med 13 %.

Dimensionerande tryckuppbyggnad, utgör en stor osäkerhet då resultaten från genomförda beräkningar innehåller stora osäkerheter. Dimensionerande tryckuppbyggnad av en explosion har utifrån genomförda CFD simuleringar och handberäkningar bedömts understiga 10 kPa. Påverkan på resenärer i vänthallen har därmed bedömts som liten vid dessa scenarier. Om dimensionerande tryck vid explosion är högre kommer detta påverka resenärer i vänthallen och därmed ökar riskbidraget. Beroende på hur spridningsbilden av ett utsläpp ser ut i ett verkligt fall kommer detta påverka både sannolikheten för antändning och konsekvenserna av dessa i form av strålningspåverkan och tryckuppbyggnad. Om scenario utsläpp/explosion kan elimineras eller mer troligt att en andel skjuts över på konsekvensen jetflamma sjunker risknivån signifikant. En eliminering av utsläpp/explosion där hänsyn tas till att dessa blir jetflamma ger en 81 % riskreduktion. Det påverkar dock inte de stora riskernas konsekvenser d.v.s. kärlsprängning, se Figur 15.



Figur 15. Risknivå där människor inte bedöms påverkas av en explosion utan istället av en efterföljande jetflamma.

Konsekvensskattningarna känslighet har analyserats genom att i beräkningarna även skatta min- och maxvärde i förhållande till det troliga scenariot för varje scenario. Totala risknivå för min och maxvärdena förhåller sig enligt följande till "trolig":

- min utgör 40 % av "troliga" risknivå
- max har en risknivå som är 54 % högre än risknivå i "trolig"

Osäkerheterna på konsekvenssidan är signifikanta. Bedömningen är dock att redovisad variation täcker in huvuddelen av samtliga olycksscenarier. Redovisade riskkurvor redovisar därmed osäkerheten i konsekvenserna av olycksscenarierna.

13 Riskreducerande åtgärder

Riskreducerande åtgärder kan antingen vara sannolikhetsreducerande eller konsekvensbegränsande. Slussens bussterminal är utrustad med ett antal riskreducerande åtgärder som är beaktade i denna analys.

Följande riskreducerande åtgärder utgör en förutsättning för analysen och nedanstående punkter beskriver bedömd effekt av dem:

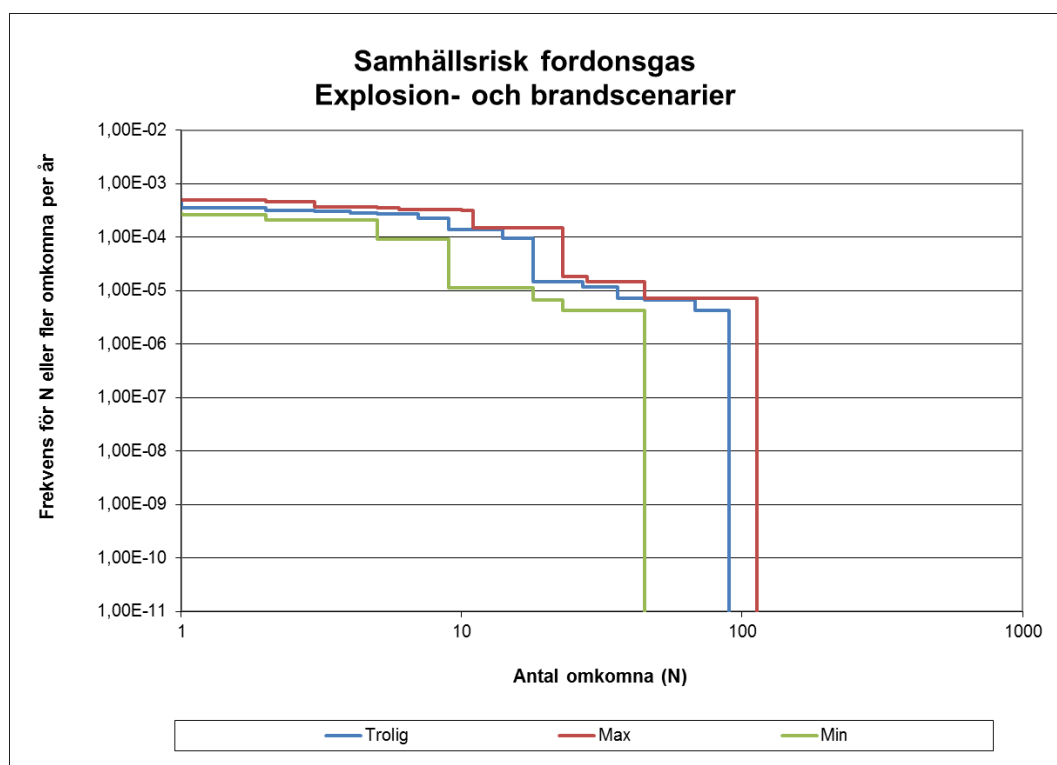
- Ett fast släcksystem påverkar brandförloppet och fordonsgassystemet och ger en riskreduktion på ca 10 % för de analyserade scenarierna. I analysen beaktas släcksystemet genom att påverkan på människor sker senare i brandförloppet (fler har hunnit utrymma) och skyddar den avskiljande konstruktionen mot vänthallen.
- Fordonssprinkler i motor, bedöms minska risknivå med ca 4 %.
- Detektionssystem, utan detektionssystem kommer riskökningen i storleksordning vara ca 70 % högre.
- Avskiljande konstruktion mellan vänthall och bussköryta, dimensioneras för att ta upp explosionstryck i enlighet med beräknat dimensionerande tryck i denna analys. Det dimensionerande trycket mot det avskiljande partiet mellan bussköryta och vänthall har beräknats till 10 kPa med en impuls på 250 ms.
- I analysen har smältsäkringarnas riktning endast analyserats ur ett perspektiv som ser på hur personer i vänthallen påverkas. En sidoriiktad jetflamma kan medföra stora konsekvenser för konstruktionen samt medföra stora dominoeffekter i form av snabb brandspridning mellan bussar och därmed stora konsekvenser för bussterminalens konstruktion.
- Installationer i busskörytan som är belägna ovanför bussarnas tak utförs ex-klassade. I analysen har hänsyn till detta tagits genom att sannolikheten för antändning av ett utsläpp på högtryckssidan har minskats.
- Bussarnas smältsäkringar har bedömts ha samma tillförlitlighet som säkerhetsventiler då statistik för smältsäkringar saknas. Detta utgör en stor osäkerhet som påverkar resultatet. Bättre statistiskt underlag om smältsäkringars tillförlitlighet skulle medföra ett mindre osäkert resultat.

Förslag på övriga riskreducerande åtgärder:

- Vid beräkningen av det dimensionerande trycket mot det avskiljande partiet mellan bussköryta och vänthall föreligger stora osäkerheter i både handberäkningar och genomförda CFD-simuleringar. Hur pass stora osäkerheterna är i CDF-simuleringarna är svåra att avgöra och simuleringarna bör valideras mot experiment som är liknande aktuella förutsättningar. En möjlig aktivitet för att öka kunskapen i samband med detaljprojekteringen är att experimentella försök genomförs.
- För att minska risken för omfattande brandförlopp är ett förslag på åtgärd att bussförare och personal i bussterminalen utbildas i agerande vid brand samt handhavande av inomhusbrandposter samt handbrandsläckare.
- Om beslut tas om att genomföra ytterligare riskreducerande åtgärder bör dessa först och främst göras på bussarnas tekniska utformning för att minska risken för utsläpp och kärlsprängning.
- Förslag på riskreducerande åtgärder är att genomföra tätare besiktningskontroller på bussar som drivs med fordonsgas. Samt att med tätare serviceintervall.
- Anläggningens säkerhetsfunktion underhålls kontinuerliga intervall för att säkerställa driften.

- Om beslutsfattarna bedömer att risknivån i bussterminalen anses vara för hög är ett förslag på riskreducerande åtgärd att inte trafikera bussterminalen med fordonsgasdrivna bussar.

14 Diskussion



Figur 16. Samhällsrisk för bussterminalen med avseende på användning av bussar drivna av fordonsgas.

Av resultatet framgår att olycksscenarier där brand utgör starthändelse påverkar den totala risknivån marginellt och framför allt de olyckorna med konsekvenser med mindre än 10 omkomna i "Trolig" skattningen, d.v.s. bidraget ligger i den övre delen av F/N-kurvan. Grovt förenklat utgör ca 15 % av den totala risknivån olycksrisker som kan kopplas samman med att olyckorna sker i anläggningen än på en ytförlagd terminal. Riskbidraget från dessa ca 15 % är kopplat till den inledande händelsen brand i fordonsgas buss. Orsaken till att denna är relativt liten är att resenärerna i terminalen blir varse om en brand och påbörjar utrymning varpå de allvarligare konsekvenserna när fordonsgasen involveras i olycksförloppet kommer när de flesta resenärerna är relativt skyddade i andra brandceller och/eller är på väg ut hur anläggningen. Ur Figur 10 kan det utläsas att det framförallt är scenarier med färre antal påverkade personer som kan kopplas till att terminalen placeras under mark.

Baserat på resultatet av analysen kan även konstateras att risknivån är att betecknas som relativt hög i jämförelse med liknande kollektiva transportsystem där denna typ av olycksscenarier inte existerar. Ur andra aspekter kan t ex äldre järnvägstunnlar etc. inneha stora potentiella risker med avseende på brand då de t ex kan sakna utrymningsvägar mm. Detta får dock ses i ljuset av den tidsepok då dessa projekterades och säkerhetsmedvetenheten inte var så stor.

Om ytterligare riskreducerande åtgärder ska införas bör dessa först och främst göras på bussarnas tekniska utformning för att minska risken för utsläpp och kärslprängning.

Resultat av känslighetsanalys och osäkerheter

Baserat på känslighetsanalysen avseende frekvens- och konsekvensuppskattningar konstateras att följande parametervärden är viktigast:

- Frekvensen för fel på gasflaskor.

- Konsekvenser av utsläpp av fordonsgas, fördröjd antändning, spridning och dimensionerande tryckuppbyggnad.
- Antal bussar och personer som befinner sig vid olyckan vid olyckstillfället, d.v.s. skillnaderna mellan min, trolig och max skattningarna för person belastning.
- Sannolikheten för att detektionssystemen fungerar.
- Sannolikheten för att fast släcksystem fungerar.

För att erhålla en rättvisande riskuppskattning är det viktigt att i erforderlig och praktiskt möjlig mån reducera osäkerheterna för dessa parametervärden. Det konstateras att nämnda parametervärden omgärdas av stor osäkerhet, vilket gör att kunskapsuppbyggnad som kan leda till reduktion av osäkerheterna sannolikt i flera av fallen är båda tidskrävande och kostsam.

De parametervärde som kommer påverka risksituationen nämnvärt med ca 80 % riskreduktion och som bedöms kunna undersökas mer ingående är konsekvensen vid utsläpp och fördröjd antändning. Enklare försök antas kunna ge svar på hur fordonsgas sprids och blandas med luft och hur konsekvenserna av en antändning blir.

15 Slutsatser

Det kan konstateras att Slussens bussterminal utgör en ur riskperspektiv komplex anläggning samt att risknivån utan särskild hänsyn till extra säkerhetsåtgärder förväntas vara hög. Det bedöms därigenom att för att erhålla en acceptabel risknivå krävs en helhetssyn där säkerheten balanseras mellan övervakning, styrning och säkerhetshöjande installationer samt inneboende passivt skydd. Det krävs en kombination av åtgärder av olika karaktär, vilka tillsammans leder till ett robust system som är väl anpassat till riskbilden och okänsligt för tillfälliga störningar eller större framtida oförutsedda händelser.

De säkerhetssystem mm som föreslås i anläggningens säkerhetskoncept antas vara nödvändiga och utgör en förutsättning för denna analys, se säkerhetskonceptet [30].

Det avskiljande partiet mellan vänthall och bussköryta, dimensioneras för att ta upp explosionstryck på 10 kPa med en impuls på 250 ms. Vid beräkningen av det dimensionerande trycket mot det avskiljande partiet mellan bussköryta och vänthall föreligger stora osäkerheter i både handberäkningar och genomförda CFD-simuleringar. För att validera det dimensionerande trycket föreslås att experimentella försök genomförs.

Bland de i analysen studerade scenarierna utgör kärlsprängning samt fördröjd antändning av utsläpp av fordonsgas från stort hål på högtryckssidan (6 mm dvs rörbrott) samt utsläpp från smältsäkring (6 mm) dimensionerande scenarier gällande tryckuppsyggnad och därmed krav på avskiljande partiet mellan vänthall och bussköryta.

16 Referenser

1. Riskbedömning för ny bussterminal för Nacka- & Värmdöbussarna vid Slussen, teknisk rapport. u.o. : Fire Safety Design (2011-12-30), 2011.
2. Slussen – Risker med biogas, PM, . u.o. : Fire Safety Design (2012-02-23), 2012.
3. AB, WSP Sverige. XA-RA-800-0200 Grovanalys fordonsgas. Stockholm : u.n., 2012.
4. IEC. International Standard 60300-3-9. Dependability management - Part 3: Application guide - Section 9: Risk analysis of technological systems. Geneve : International Electrotechnical Commission, 1995.
5. ISO. Risk management - Vocabulary . Guidelines for use in standards, Guide 73. Geneva : International Organization for Standardization, 2002.
6. Nystedt, Fredrik. Riskanalysmetoder. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2000.
7. Davidsson, Göran, Lindgren, Mats och Mett, Liane. Värdering av risk. FoU rapport - DNV. u.o. : Statens Räddningsverk, 1997.
8. Säkerhetsdatablad för biogas, rev 1 . u.o. : AGA , 2008-02-04.
9. Comparison of Product Evaluation Systems in Europe for Road and Rail Services . Sundström, Björn. Gothenburg, Sweden : SP, First International Conference on Fire in Vehicles, September 29-30, 2010.
10. Brand med två biogasbussar i stadstrafik i Helsingborg, Skåne Län, den 14 februari 2012. u.o. : Statens Haverikommission, 2013-02-13. ISSN 1400-5743.
11. Ingasson, Haukur, o.a., o.a. Räddningsinsatser i vägtunnlar. u.o. : Statens Räddningsverk, 2005.
12. www22.vv.se/filer/publikationer/BF.pdf. Tunnlar i Storstad – Säkerhets- och miljöaspekter. u.o. : Nordiska vägtekniska förbundet,, 2002.
13. Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Booklet 4, Specific Hazard Investigations . u.o. : Centre d'Études des Tunnels (Tunnel Study Centre), September 2003.
14. Bus fire safety an statistics. Petzäll, Jan. Gothenburg, Sweden : Swedish Transport Agency, September 29-30, 2010.
15. LTH, Andersson B. Andersson P. Holmstedt G. och Särndqvist S. Naturgas, Säkerhetsnivå, Riskanalys, , Lund, 1994. Lund, Sverige : Avdelningen för Brandteknik, Lunds Universitet, 1994.
16. Committee for the preven-tion of disasters. CPR 18E (1992) . Guideline for quantitative risk assessment, purple book. The Netherlands : u.n., 1992.
17. Bus fires in the United States: Statistics, Causes and Prevention , Second International Conference on Fire in Vehicles. Robert A. Crescenzo, Lancer Insurance Company. Chicago, USA : u.n., September 27-28, 2012.
18. Bus Fires in 2010-2011 in Finland, Second International Conference on Fire in Vehicles. Esa Kokki, Emergency Services College. Chicago, USA : u.n., September 27-28, 2012.
19. Historical Fires and their Impact on Regulations and Research, Second International Conference on Fire in Vehicles. Petra Andersson & Björn Sundström, SP. Chicago, USA : u.n., September 27-28, 2012.
20. PIARC. Fire and smoke control in road tunnels. u.o. : PIARC - World Road Association, 1999.
21. Johansson, Henrik. Osäkerheter i variabler vid riskanalyser och brandteknisk dimensionering, rapport 3105. Lund : u.n., 1999. ISSN:1402-3504.

22. Jensen, Marie-Louise Bjerg and Hanne H. Reliability of sprinkler systems. u.o. : DBI, May 2003. Report DX14260.
23. Forsén, Rickard och Lamnevik, Stefan. Verkan av explosioner i det fria. u.o. : Stefan Lamnevik AB, 2010.
24. FOA. Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor - Metoder för bedömning av risker, FOA - R-00490-990-SE. u.o. : Försvarets forskningsanstalt, 1997.
25. Ltd., Technica. Techniques for Industrial Assessing Hazards - A Manual. u.o. : World Bank Publications, 1988.
26. Räddningsverket. Handbok för riskanalys. Karlstad : Räddningsverket, 2003.
27. Abrahamsson, M. Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterisation and Methods of Treatment. Lund, Sweden : Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2002. Report 1024.
28. VTI. Riskanalysmetod för farligt gods på väg och järnväg, VTI Rapport 387:1. Linköping : Statens väg- och transportforskningsinstitut, 1994.
29. —. Konsekvensanalys av olika olyckscenarier vid transport av farligt gods på väg och järnväg. VTI-rapport 387:4. u.o. : Väg- och transportforskningsinstitutet, 1994.
30. Nygren G. Östlund A. Tekniskt underlag för detaljplan – Säkerhetskoncept, Rapport – Brand/Risk, Stockholm, 2016.
31. Jeffery Archer, Slussen bussterminal och vägkorsningen vid fotografiska museet. 2011-12-19, SWECO

WSP Sverige AB

121 88 Stockholm-Globen

Besök: Arenavägen 7

Tel: +46 10 7225000

WSP Sverige AB

Org nr: 556057-4880

Styrelsens säte: Stockholm

<http://www.wspgroup.se>

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE





UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Bilaga 1 – Konsekvensberäkningar från grovanalys

Stockholm

2016-09-20

Innehåll

1	Konsekvensberäkningar från grovanalys	3
2	Utsläpp från trycksatta behållare och rörsystem	4
2.1	Utsläpp vid 200, 150, 100 och 50 bars initialtryck	4
2.2	Utsläpp vid 15, 10, 5 bars initialtryck.....	7
3	Omfattning av riskhantering och metod.....	11
4	Flamlängd och strålningsnivåer från jetflammar.....	13
4.1	Flamlängder	13
4.2	Strålning från jetflammar av naturgas	13
4.3	Sammanfattning av flamlängd och flamstrålning.....	17
5	Fördelning av naturgaskoncentration	18
5.1	Högtryck 150 bar, volym 500 m ³	19
5.2	Högtryck 150 bar, volym 1000 m ³	20
5.3	Högtryck 150 bar, volym 4000 m ³	21
5.4	Tryck 10 bar, volym 500 m ³	22
5.5	Sammanfattning	23
6	Tryckverkan vid fördröjd antändning	24
6.1	Sammanfattning	25
7	Gränsvärden för värme- och tryckskada	26
8	Referenser	28
9	Bilagor	28

Ref. Nr	Namn	Titel	Version/Datum
1	X4-RA-800-0101_bilaga 5	CFD beräkningar GexCon	-

1 Konsekvensberäkningar från grovanalys

För att bedöma risken vid brand och explosion från utsläpp av gas i trycksatta behållare har uppskattningar gjorts med beräkningsmodeller och publicerade experimentella data. Bedömningen har omfattat:

1. Beräkning av utsläppet genom hål av olika storlek i trycksatta behållare och rörsystem.
2. Beräkning av hur långt den brännbara blandningen sträcker sig i längs- och sidled från utsläppspunkten för att uppskatta riskavståndet för potentiella antändningskällor.
3. Bedömning av flamlängden och flamstrålningen på olika avstånd från utsläppet när gasblandningen antänts.
4. Beräkning av hur gaser ansamlas i volymen ovanför utsläppspunkten för att bedöma hur stor gasvolym som kan delta vid en eventuell gasexplosion vid en fördröjd antändning.
5. Beräkning av tryckverkan på olika avstånd från centrum i gasmolnet vid fördröjd antändning.
6. Sammanställning av gränsvärden för värme- och tryckskada för människa och material.

Punkt 1 – 3, som redovisas i avsnitt 1-3, ger en uppskattning av risk för att utsläpp antänds direkt samt flamlängd och värmeverkan på olika avstånd från flamman.

Punkt 1,4 – 5, som redovisas i avsnitt 1, 4-5, används för att uppskatta tryckökning i samband med explosion vid fördröjd antändning.

Punkt 6, som redovisas i avsnitt 6, ger en sammanställning av gränserna för värme och tryckskada.

Bedömningen är avsedd att användas vid en konsekvensanalys av gasutsläpp av olika storlek vid direkt eller fördröjd antändning.

2 Utsläpp från trycksatta behållare och rörsystem

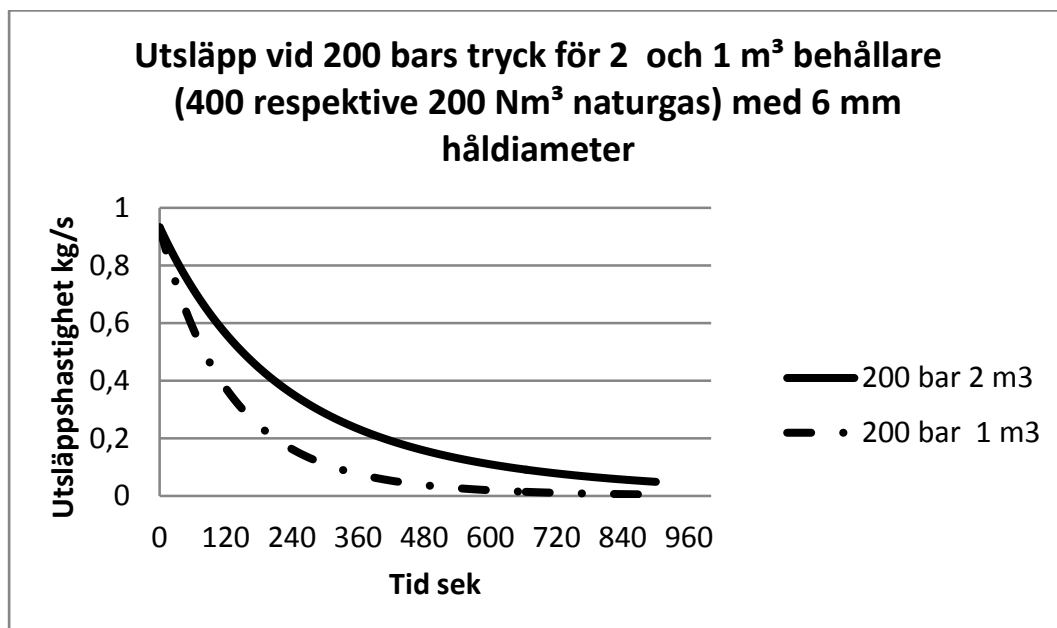
Beräkningsalgoritmernaⁱ är validerade mot simuleringar, ALOHAⁱⁱ för 50 bars tryck (vilket utgör en begränsning i programmet) med samma volym och håldiameter. Utsläppet med ALOHA blir 0,13 kg/s ”avareged over a minute ore more”. Beräkningsalgoritmernaⁱ ger medelvärde av utsläppet till 0,19, 0,15 och 0,11 kg/s under 1, 2 respektive 4 minuter. För simuleringarna beräkningsalgoritmernaⁱ valdes en ”discharge coefficient” $C_d = 1$. För verkliga utsläpp varierar C_d med utsläpphålets utseende. För rundade hål anges i litteraturen värde på C_d mellan 0,95 till 0,99. För skarpa hål sätts C_d vanligen till 0,62. Då utsläppet är direkt proportionellt mot C_d betyder att valet av $C_d = 1$ överskattar utsläppshastigheten med mellan 1 – 38 % i diagrammen nedan.

2.1 Utsläpp vid 200, 150, 100 och 50 bars initialtryck

Utsläppet är beräknat vid olika diametrar på hål samt inverkan av det tryck vid vilken smältsäkringen utlöser.

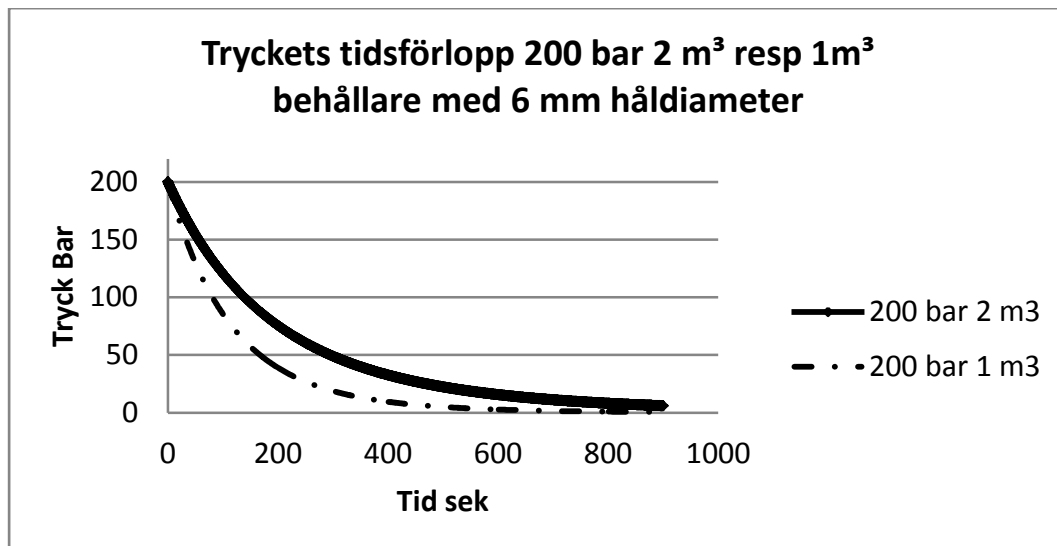
Om inte annat anges antas att begynnelsestemperaturen i gasbehållarna är 23 °C.

Beräkningarna enligt algoritmerⁱ redovisas nedan i figur 1-4 för det fall då en smältsäkring med 6 mm diameter brister. Det är osäkert vilket temperatur gasen har i behållaren då smältsäkringen brister. Då endast lite värme tillförs gasen i flaskan under utsläppet blir processen adiabatisk d.v.s. samtidigt som trycket minskar kommer även gastemperaturen i utsläppet att minska. I Figur 1-4 antas gastemperaturen vara 23 °C då smältsäkringen brister.



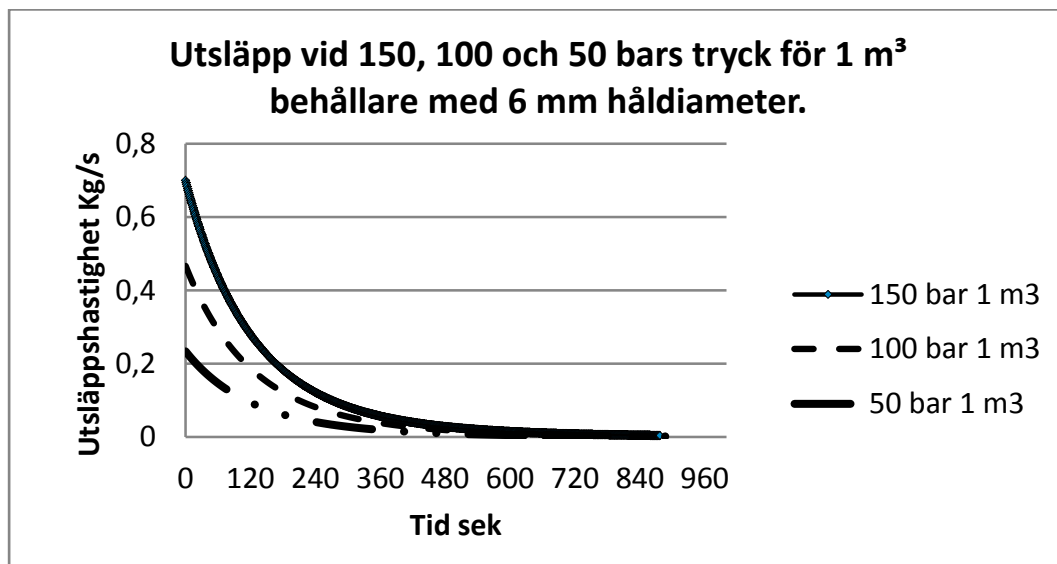
Figur 1 Inverkan av volym i behållarna för 6 mm hål.

En större mängd gas i gasbehållaren medför endast att minskningen av utsläppet avtar långsammare än med en mindre gasvolym. I ett verkligt fall har bussarna flera flaskor, alla med smältsäkring. Dessa smältsäkringar kan utlösas vid olika tidpunkter varför utsläppet kan få en annan form och varaktighet. Flaskorna är dock sammankopplade med ett rörsystem. Överföringen av gas mellan flaskorna beror på friktionsmotstånd i rörsystemet (innerdiameter, rörlängd, antalet krökar) och tryckskillnaderna mellan flaskorna. Friktionsmotståndet i rörsystemet är avsevärt större och tryckskillnaderna mellan flaskorna avsevärt mindre än för ett hål på en flaska rakt ut i luften. Mot denna bakgrund har resultatet nedan, för en gasvolym av 1 m³ använts. Om flera smältsäkringar utlöser inom 10 - 15 minuter bedöms den totalt utströmmade gasen vara av samma storleksordning som beräkningarna nedan.



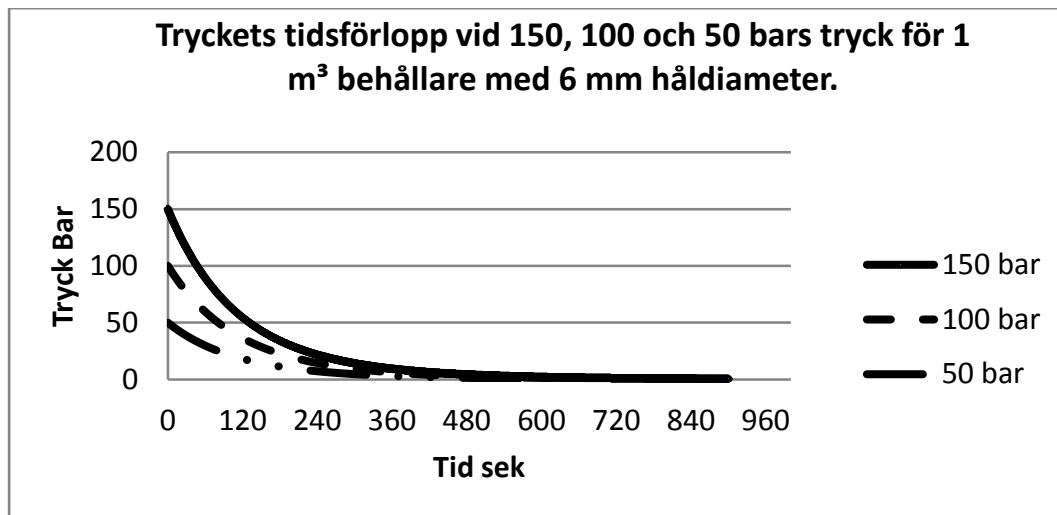
Figur 2 Tryckminskningen vid olika storlek på volymen i behållarna.

Trycksänkningen för olika storlek på behållarna följer samma trend som utsläppen i Figur 1.

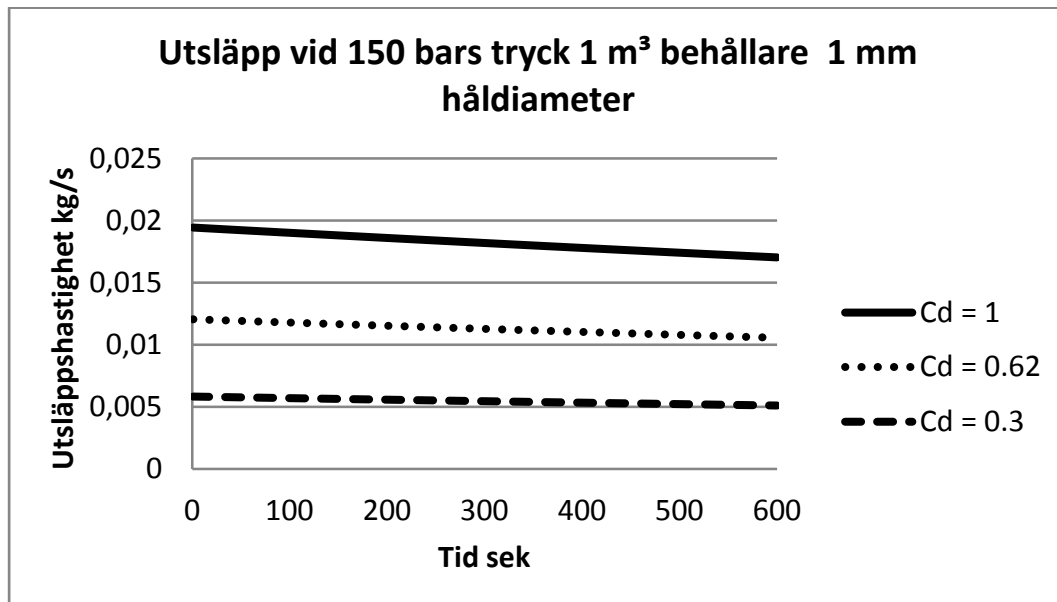


Figur 3 Inverkan på utsläpp vid olika behållartryck för 6 mm hål, 1m³ flaskvolym.

När initialtrycket sänks från 150 till 50 bar minskar utsläppet från 0,7 till 0,22 kg/s.



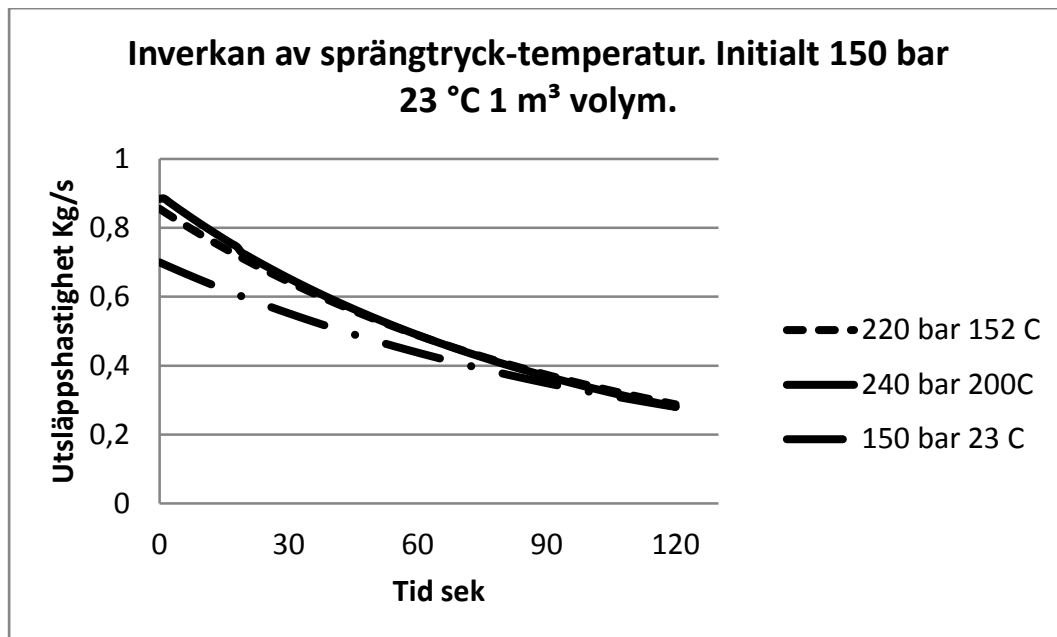
Figur 4 Inverkan på tryck för 6 mm hål med behållarvolym 1m³.



Figur 5 150 bar, 1 mm håldiameter.

Läckage från små hål kommer sällan från runda hål vilket resulterar i att flödeskoefficienten C_d blir mindre 1. Utflödet skalar direkt med C_d . Hur stor C_d är i ett verkligt fall är svårt att uppskatta, i litteraturen används ofta $C_d = 0,62$. I figuren visas utsläppet för tre olika C_d . När man inte vet något om hålgeometri och flödesbild inne i rör eller behållare är CFD-beräkningar inte ett alternativ.

Vid en bussbrand värms gasbehållarna och gasen upp. Då volymen är konstant i flaskorna kommer trycket att öka till dess smältsäkringen utlöser. När sprängsäkringen utlöser påverkar utsläppet. I Figur 6 redovisas hur sprängtryck och temperatur i gaserna i flaskan påverkar utsläppet för initialt 150 bar vid 23 C i behållaren.



Figur 6 Inverkan av sprängtryck och gastemperatur i behållarna.

Av Figur 6 framgår att utsläppet ökar när trycket höjs i behållarna. Hur pass mycket beror på den säkerhetsfaktor som används för behållarna och hur den faktorn påverkas av temperaturen. Vid 240 bars sprängtryck ökar utsläppet från c:a 0,7 till 0,9 kg/s.

2.1.1 Sammanfattning för 6 mm håldiameter högt tryck.

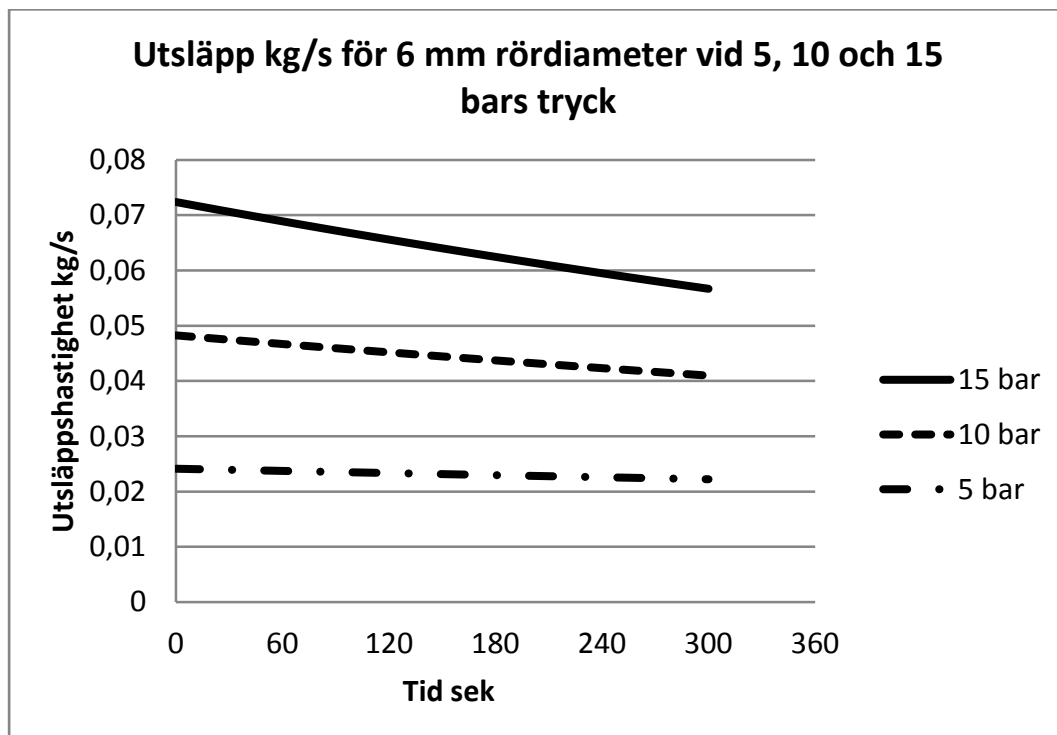
1. Vid 150 bars tryck beror utsläppshastigheten av hur smältsäkringen är konstruerad.
2. Vid 150 bars initialtryck varierar det maximala utsläppshastigheten mellan 0,7-0,9 kg/s för sprängtryck upp till 240 bar.
3. När gasmängden i flaskorna ökas påverkar inte den maximala utsläppshastigheten utan endast hur pass långsamt den sjunker.
4. Beräkningarna avser en ideal metangas. Avvikelsen från ideal gas bedöms inte avsevärt påverka utsläppen.
5. Vid beräkningarna har discharefaktorn valts till 1 vilket överskattar utsläppshastigheten mellan 1-38 % beroende på hålets geometri.
6. Effekten vid antändning erhålls genom att multiplicera utsläppshastigheten med 45-50 MW/kg d.v.s. att effekten blir i storleksordning 30-45 MW.
7. Utsläpp från små hål i storleksordning 1 mm² ger utsläpp vid 150 bars tryck på c:a 0,006 – 0,012 kg/s d.v.s. potentiella brandeffekter på 300-600 kW.

2.2 Utsläpp vid 15, 10, 5 bars initialtryck

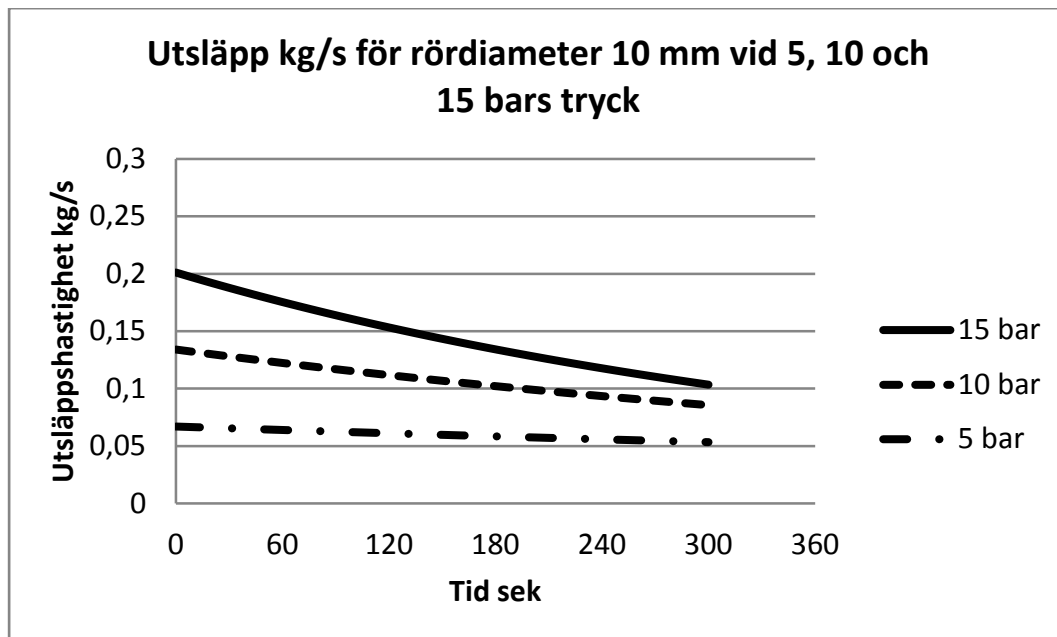
Beräkningarna enligt algoritmerⁱ ovan och redovisas nedan i Figur 7-9 för det fall då ett rör med 6, 10 och 12 mm diameter brister vid en temperatur av 23 °C. Mellan gasflaskorna och lågtrycksdelen finns en tryckreduceringsventil. Tryckreduceringsventilens tryck-flödes karaktäristik antas vara sådan att trycket som levereras via endast sjunker något allteftersom gasttrycket i flaskorna på taket sjunker. Med andra ord har lagringsvolymen i flaskorna ökats så att de innehåller samma gasmassa 1 m³ vid 150 bar metan.

Beräkningsalgoritmernaⁱ är validerade mot simuleringar med ALOHAⁱⁱ för 15, 10 och 5 bars tryck med samma volym och håldiameter, 6 mm. Utsläppet med ALOHA blir 0,04, och 0,027 kg/s respektive ”avareged over a minute ore more” med en kort rörstump ansluten till behållaren. Beräkningsalgoritmerna ger initialt enligt Figur 1 0,072, 0,048 och 0,014 kg/s respektive d.v.s. c:a dubbelt så mycket som ALOHA. För simuleringarna enligt algoritmerna valdes en ”discharge coefficient” $C_d = 1$. För verkliga utsläpp varierar C_d med utsläppets utformning. För rundade hål anges i litteraturen värde på C_d mellan 0.95 till 0.99. För skarpa hål sätts C_d vanligen till 0,62. Då utsläppet är direkt proportionellt mot C_d betyder att valet av $C_d = 1$ överskattar utsläppet mellan 1 – 38 % i diagrammen ovan.

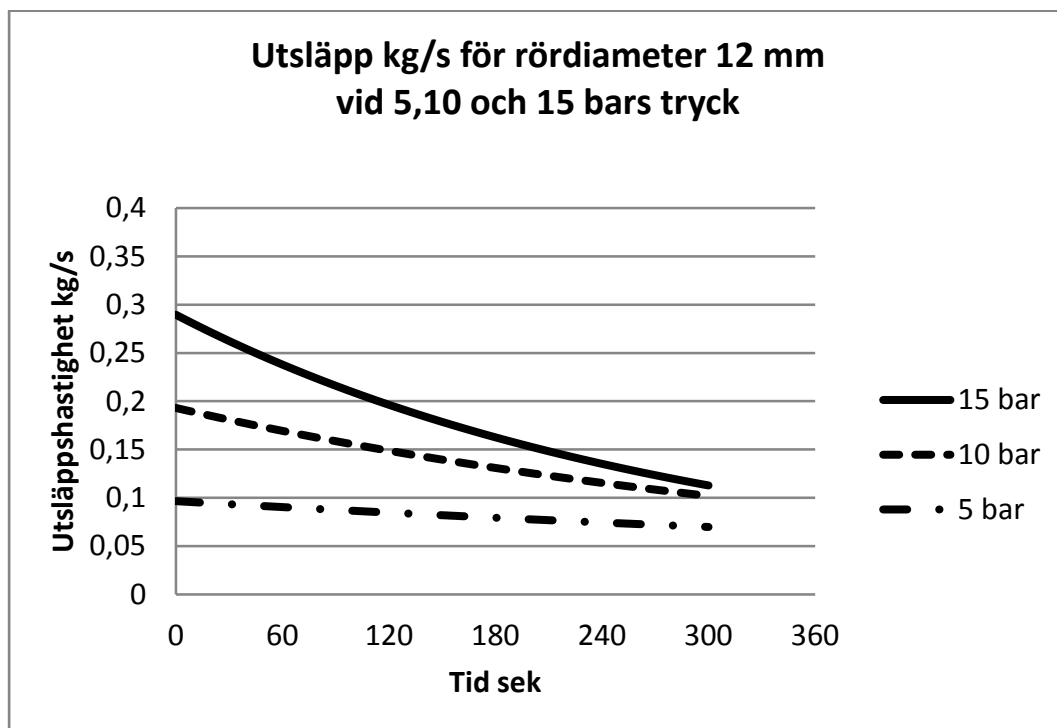
I figur 7-9 visas utsläppet i kg/s vid 5, 10 och 15 bars tryck för rör med innerdiameter 6, 10 och 12 mm.



Figur 7 Utsläpp vid 6 mm innerdiameter.



Figur 8 Utsläpp vid 10 mm innerdiameter.



Figur 9 Utsläpp vid 12 mm innerdiameter.

2.2.1 Sammanfattning för 6 mm håldiameter lågt tryck.

1. Vid 5-15 bars tryck i gasledningarna beror utsläppsnivån av tryckreduceringsventilens flödes-tryckkurva. Den är helt avgörande för utsläppets storlek.
2. Vid 5-15 bars ledningstryck varierar utsläppet mellan 0.014 -0.28 kg/s för ledningsrör med innerdiameterar varierande mellan 6-12 mm och trycket varierande mellan 5 och 15 bar under förutsättning att tryckreduceringsventilen inte minskar flödet.

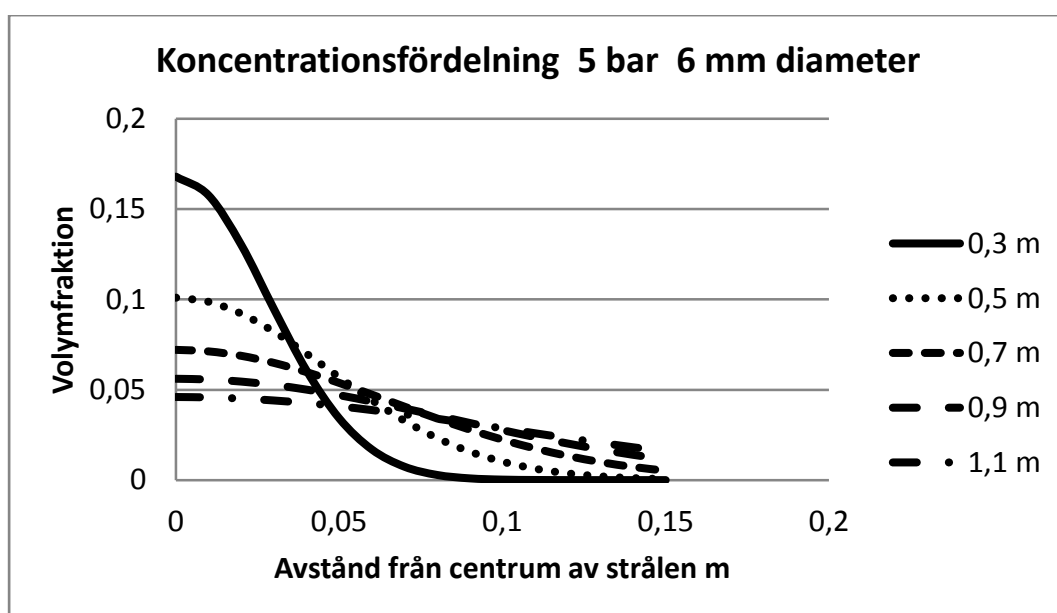
3. När gasvolymen i flaskorna ökas påverkar inte den maximala utsläppsnivån utan endast hur pass långsamt den sjunker.
4. Beräkningarna avser en ideal metangas. Avvikelsen från ideal gas bedöms inte avsevärt påverka utsläppen.
5. Vid beräkningarna har dischargetaktorn valts till 1 vilket överskattar utsläppshastigheten mellan 1-38 % beroende på hålets geometri.
6. Effekten vid antändning erhålls genom att multiplicera utsläppshastigheten med 45-50 MW/kg d.v.s. i storleksordning 0,6 - 14MW med innerdiametererna varierande mellan 6-12 mm och trycket varierande mellan 5 och 15 bar under förutsättning att tryckreduceringsventilen inte minskar flödet.
7. En kort rörstump påverkar inte utflödet nämnvärt.

3 Omfattning av riskhantering och metod

Beräkningar har genomförts vid tryck 5, 10 och 150 bar vid utsläpp genom ett hål med diametern 6 mm.

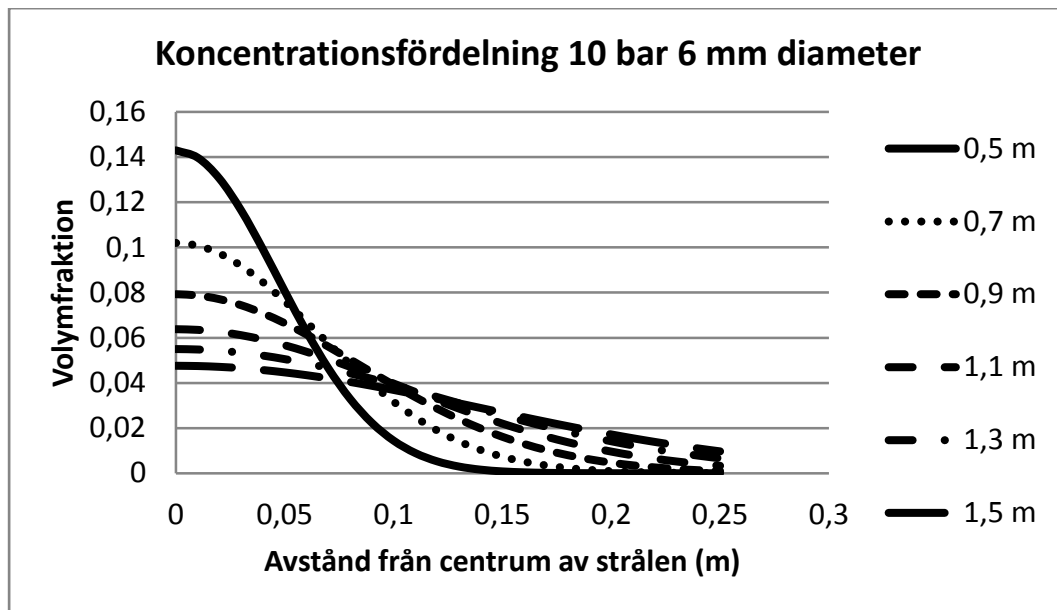
För att simulera dispersionen för en jet av naturgas som strömmar ut genom ett litet hål under stort tryck krävs avancerade CFD-beräkningar. Vid denna analys används istället en korrelation som utarbetats av Chen och Rodi (1980) som visat sig ge relativt god överensstämmelse med experiment och mer avancerade CFD-beräkningar. Som kvalitetskontroll av beräkningarna med Chen och Rodis korrelation har beräkningar enligt FOA's rapport om "vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor" använts. FOA beräkningarna ger dock kortare avstånd (c:a halva längden) då denna metod antar att koncentrationsfördelningen i sidled är jämn vilket är ett orealistiskt antagande som ger för kort avstånd från utsläppspunkten till den punkt i längdled där koncentrationen sjunkit till den undre brännbarhetsgränsen (5 vol% för naturgas),

Koncentrationsprofilen i Figur 10-12 nedan ger koncentrationsprofilen i sidled för olika avstånd från utsläppspunkten.



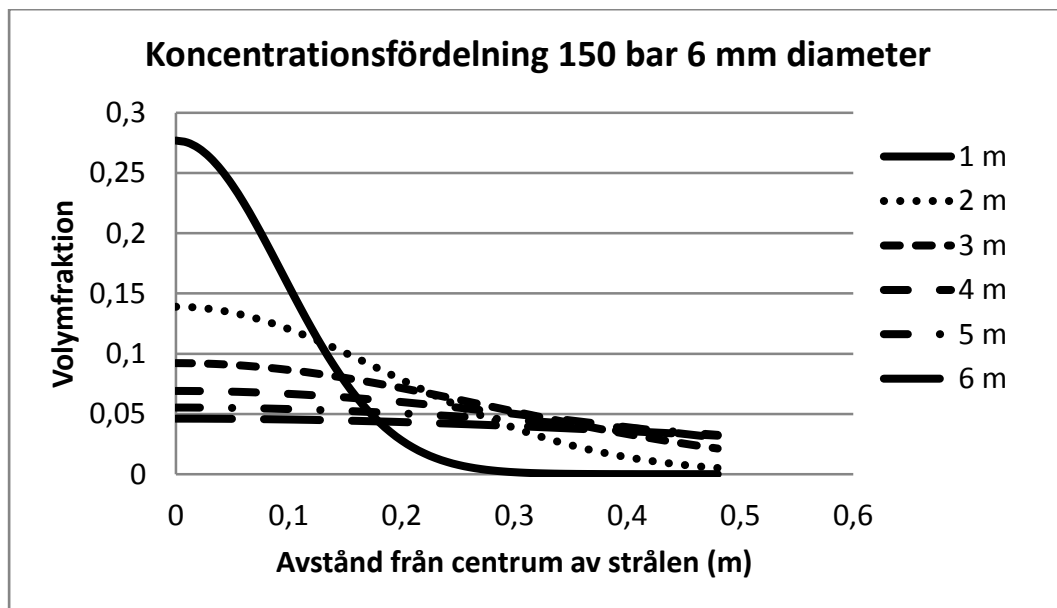
Figur 10 Volymfraktion naturgas i sidled för olika avstånd från utsläppspunkten.

För naturgas är den undre brännbarhetsgränsen c:a 5 vol% d.v.s. 0,05 volymsfraktion. Vid 5 bars tryck sträcker sig det brännbara området i längdled till C:a 1 m och i sidled till högst 6-7 cm från centrum av strålen.



Figur 11 Volymfraktion naturgas i sidled för olika avstånd från utsläppspunkten.

Vid 10 bars tryck sträcker sig det brännbara området i längdled till C:a 1,3 m och i sidled till högst 7-8 cm från centrum av strålen.



Figur 12 Volymfraktion naturgas i sidled för olika avstånd från utsläppspunkten.

Vid 150 bars tryck sträcker sig det brännbara området i längdled till C:a 5 m och i sidled till c:a 0,3 m från centrum av strålen.

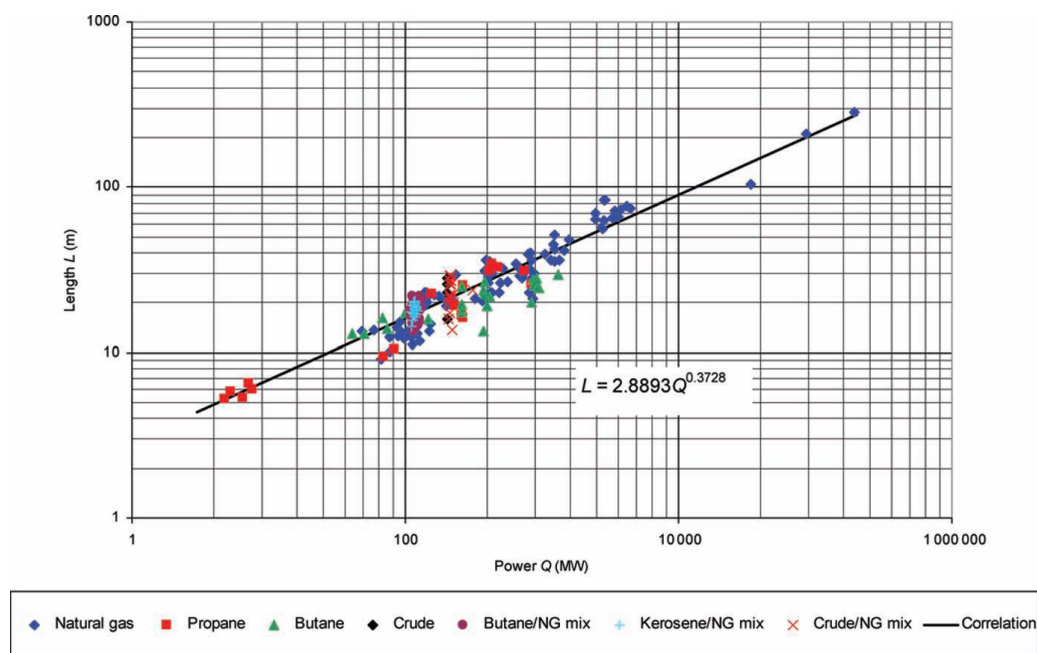
Om gasblandningarna antänds expanderar gasvolymen en faktor 5-7 d.v.s. flammorna kommer att bli avsevärt längre än de beräknade avstånden för brännbar koncentration i kalla gaser.

4 Flamlängd och strålningsnivåer från jetflammar

4.1 Flamlängder

Flamlängden från en ett utsläpp av naturgas kan beräknas med en mängd olika metoder. Den metod som valts är att använda korrelationer som tagits fram genom jämförelse med ett mycket omfattande experimentellt material^{iii, iv}.

En korrelationⁱⁱⁱ mellan flamlängd och effektutveckling från jetflammar med olika kolvätebränslen.



Figur 13 Flamlängder som funktion av effektutvecklingⁱⁱⁱ.

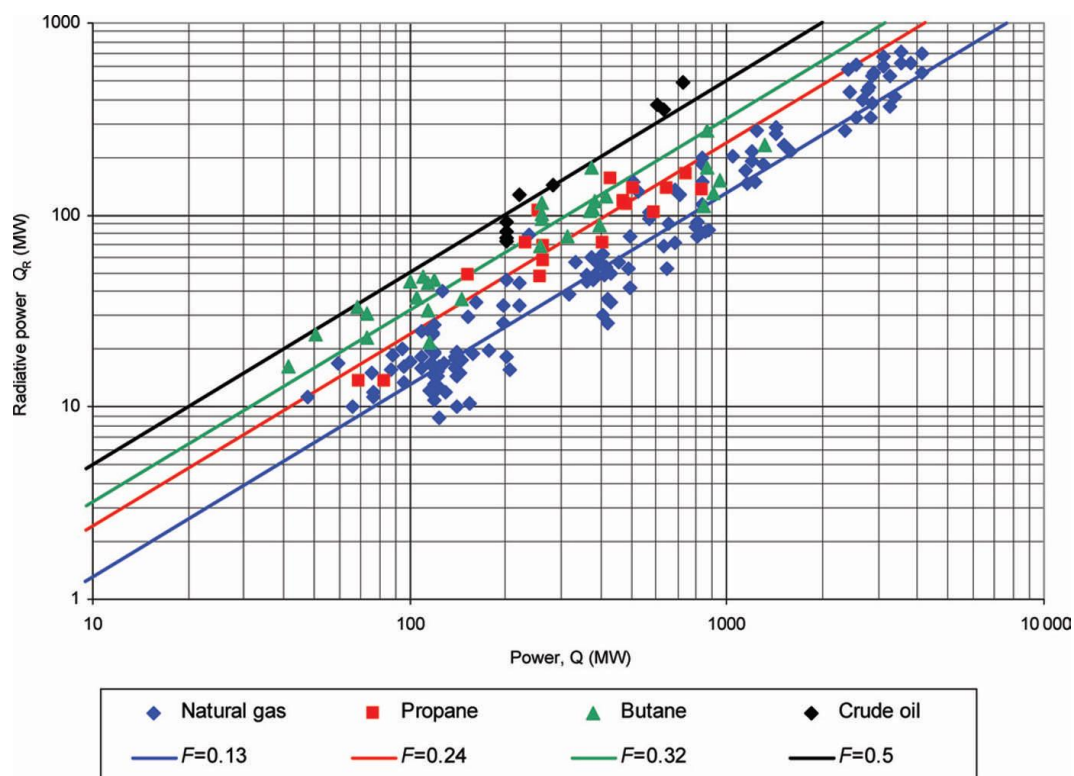
Ur figuren har flamlängder beräknats för effektintervallet 0,5 till 50 MW med hjälp av korrelationen $L = 2,8893 \cdot Q^{0,3728}$. Längderna redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Flamlängder vid olika effekter i jetflammar (ganska oberoende av typ av kolväte).

Effekt MW	0,5	1	2	5	10	20	30	40	50
Flamlängd meter	2,2	2,9	3,7	5,3	6,8	8,8	10,3	11,4	12,4

4.2 Strålning från jetflammar av naturgas

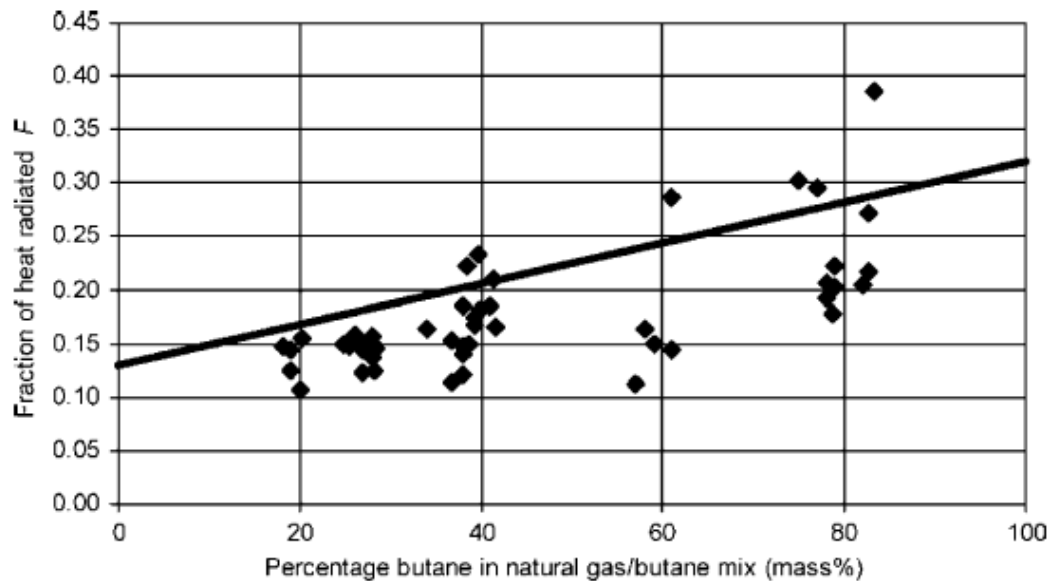
Förbränningsprocessen i en naturgasjetflamma är relativt effektiv och producerar lite sot. Flammorna från en naturgasjet är därför inte så lysande som från flammar från tyngre kolväten. Flammorna från naturgas blir inte optiskt tjocka (emissionsfaktorn blir avsevärt mindre än 1) vilket resulterar att strålningsöverföringen till omgivningen blir mindre än för tyngre kolväten. Detta återspeglas i den fraktion av effektutvecklingen som strålar ut för naturgasflammar, F , blir mindre än för tyngre kolväten. I Figur 14 redovisas F som funktion av effektutveckling och typ av kolväte.



Figur 14 Strålningsfraktion som funktion av effekt och typ av bränsleⁱⁱⁱ.

Strålningsfraktionen (emissiviteten), F , för en jetflamma av naturgas är enligt korrelationen i storleksordning 0,13. En 10 MW flamma strålar ut c:a 1,3 MW. Huvuddelen av effekten blir således konvektiv värme som resulterar i en mycket stor värmeöverföring till föremål som träffas av gasströmmen från flammor. Brännbara material som trä, gummi och plastmaterial som träffas av de varma gaserna kommer att antändas nästan omedelbart. På objekt på längre avstånd från flammorna domineras värmeöverföringen helt av strålning.

Naturgas består inte helt av metan även om andelen metan vanligtvis är mer än 95 %. I vissa fall blandas tyngre kolväten in. Denna inblandning påverkar inte flamlängden nämnvärt men den ökar strålningsfraktionen, F , från flammorna. I Figur 15 visas hur strålningsfraktionen (emmisiviteten) påverkar inblandning av butan i naturgas.



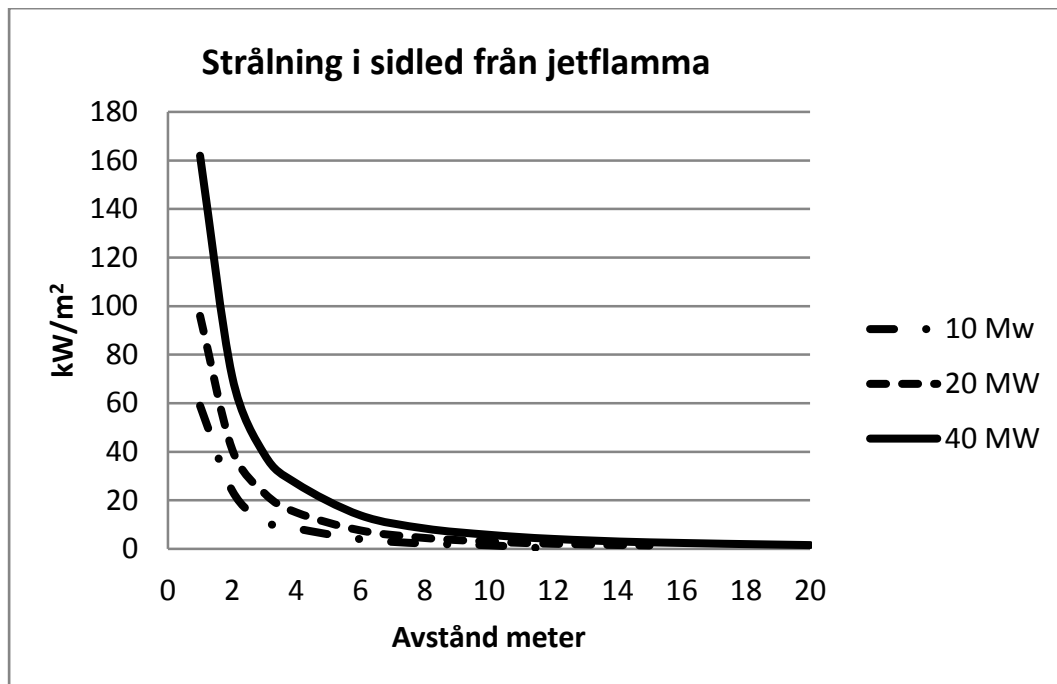
Figur 15 Fraktion utstrålad effekt för naturgas-butan blandningarⁱⁱⁱ.

Även för en relativt stor inblandning av butan påverkas strålningsfaktorn måttligt.

I beräkningarna nedan av strålningsnivåer på olika avstånd från flammorna har ett konservativt värde på strålningsfaktorn (emmisiviteten), $F=0,2$, valts.

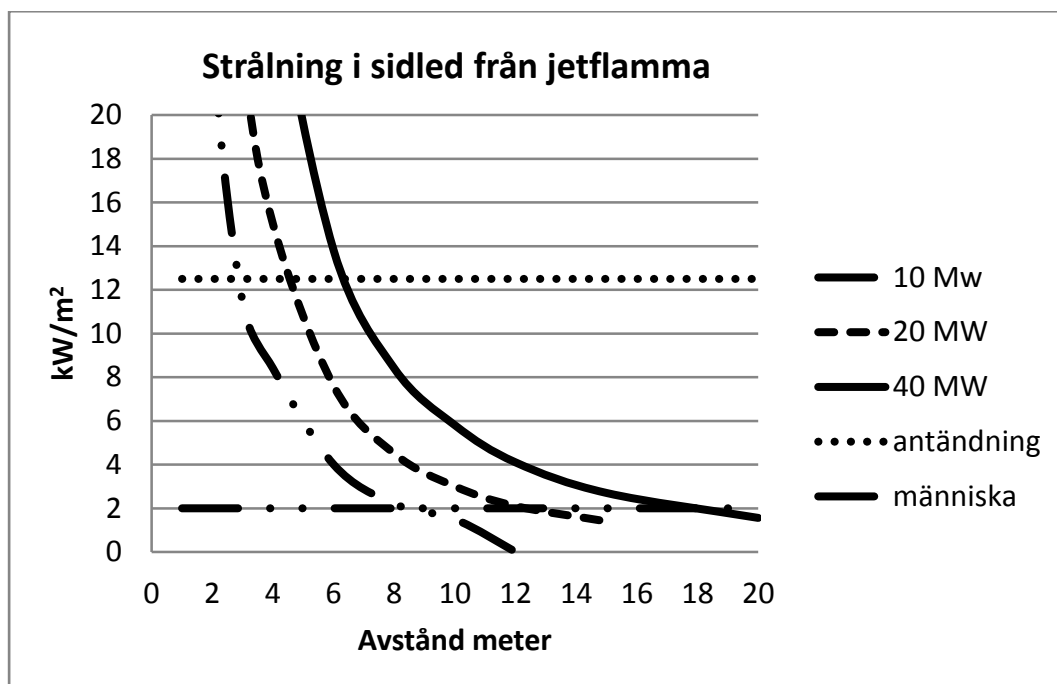
Strålningsberäkningarna har genomförts genom att fördela den totalt utstrålade energin i ett antal (7-11) punkter fördelade jämt på flamlängden. Som strålningsfraktion (emmisivitet) har $F=0,2$ valts.

I Figur 16-18 visas hur strålningen varierar på olika avstånd vinkelrät mot flamman. I flammans längdled bidrar både den konvektiva värmen strålningen från flamman till riskavståndet. På längre avstånd från flamman där de heta förbränningsgaserna böjts av uppåt får man ungefär samma strålningsnivåer som i flammans sidled.

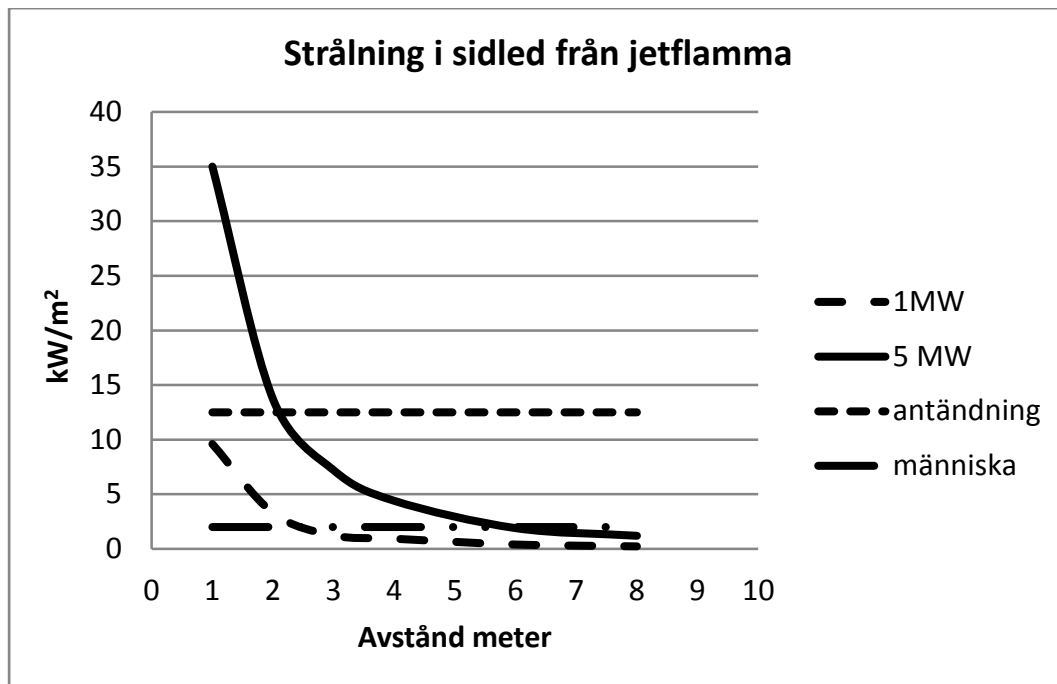


Figur 16 Strålning från 10, 20 och 40 MW jetflamma.

Inom två meters avstånd antänds brännbart material som trä, plast och gummi inom någon enstaka minut.



Figur 17 Förstorad del av Figur 16.



Figur 18 Strålning från 1 och 5 MW jetflamma.

I Figur 17 och 18 finns även två linjer markerade på en konstant strålningsnivå. 12,5 kW/m² är den nivå där vissa material som trä och plaster kan avge antändbara gaser efter en längre tids exponering (c:a 10 minuter). 4 kW/m² är en nivå som en människa kan tåla under 20 sekunder utan att få andra gradens brännskador.

4.3 Sammanfattning av flamlängd och flamstrålning

1. Jetflammans längd är relativt oberoende av typen av det gasformiga bränslet.
2. För utsläpp av naturgas som eventuellt blandats upp med butan ges flamlängderna av Tabell 1 för effektutveckling mellan 0,5 – 50 MW.
3. Flamstrålningen från en naturgasflamma är mindre än 20% av den utvecklade effekten.
4. Brännbara material som direkt träffas av flammen antänder inom några sekunder.
5. Strålningsnivån på 2 m avstånd i sidled från flammor antänds inom någon enstaka minut av flammor med effekter mellan 10-40 MW.
6. Figur 5 och 6 visar strålningsnivån för material som kan ge antändbara gaser om de utsätts en längre tid för strålning.
7. Figur 5 och 6 visar strålningsnivån som för människa bedöms som säker d.v.s. inte ger andra gradens brännskador vid utrymning.

5 Fördelning av naturgaskoncentration

Fördelningen av utsläppet i rummet ovanför utsläppspunkten beror av flera variabler som insuget av luft i jeten, utbredning i höjd och sidled med luftinblandning och utsug av gasblandningen via ventilationskanaler. Fördelningen är således tredimensionell och kräver avancerade beräkningsmetoder. CFD-beräkningar har genomförts och presenteras i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 5 [1]. I denna bilaga har en förenklad metod från boken "Gas explosions" av Harris använts. Metoden antar att gaserna (i detta fall naturgas med en densitet som är lägre än omgivningens luft) fördelar sig jämt i gasvolymen ovanför utsläppet. För att använda metoden krävs att man känner till den volym (i detta fall en del av den totala terminalvolymen) som gaserna fördelas inom samt utsläppspunktens höjd.

Vid beräkningarna nedan har:

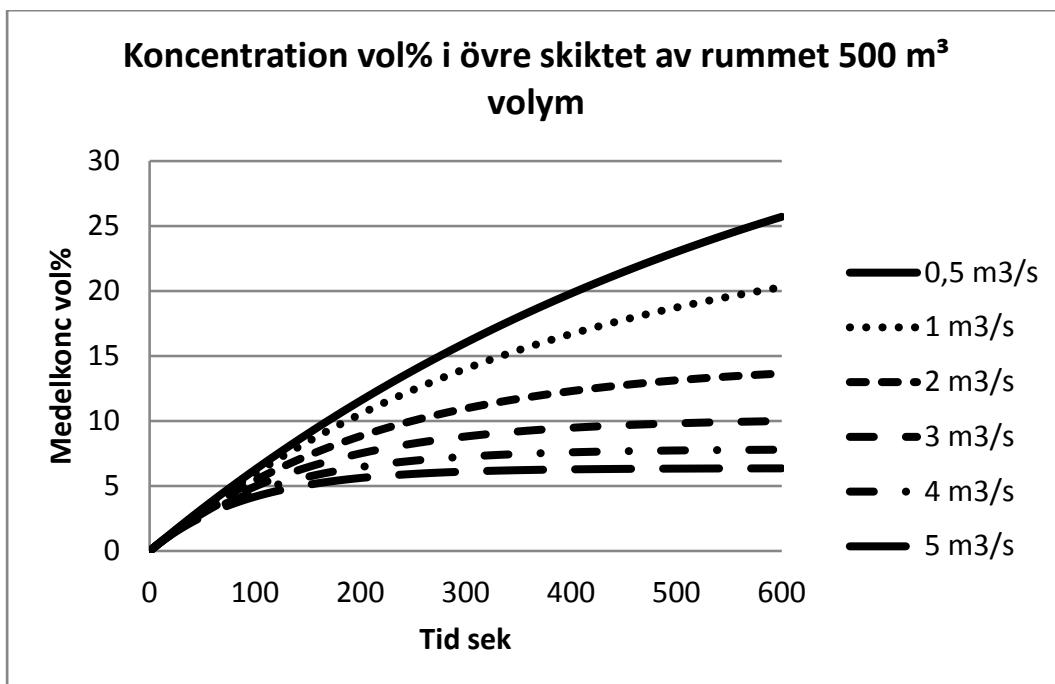
- Volym, (500, 1000 och 4000 m³) i övre delen av rummet, V, som naturgasen blandats med varierats.
- Utsläppet har vid beräkningarna hållits konstant till 0,22 kg/s under 10 minuter vilket är ett medelvärde för 150 bars tryck enligt tidigare utsläppsberäkningar med ett 6 mm hål, figur 3. Det motsvarar ett gasflöde Q_{gas} på c:a 0,34 m³/s (densiteten för metan = 0,68). För lågtryckutsläppet används ett konstant gasflöde på 0,04 kg/s under 10 minuter vilket är ett medelvärde för 10 bars tryck enligt tidigare beräkningar med ett 6 mm hål, Figur 9. Detta motsvarar ett gasflöde på c:a 0,06 m³/s.
- Ventilationen från volymen i "övre delen av rummet", $Q_{fläkt}$ varierats med 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 m³/s d.v.s. antagit att en eller flera ventilatorer deltagit i utsuget.
- Medelkoncentration och den mängd naturgas (kg) med en koncentration över undre brännbarhetsgränsen i övre delen av rummet beräknats.
- Med hjälp av kännedom om storleksordningen av den mängd naturgas (kg) som har en koncentration över undre brännbarhetsgränsen kan man få en grov uppskattning av hur stort explosionstrycket blir och hur pass långt förbränningsvågen når på olika avstånd från antändningspunkten.
- Med denna information kan man göra en grov bedömning av risk för antändning av och tryckskador på material.
- Med denna information kan man göra en grov bedömning av risk och bränn- och tryckskador (inklusive splitterskador) på personer.

Vid beräkningarna användes formeln:

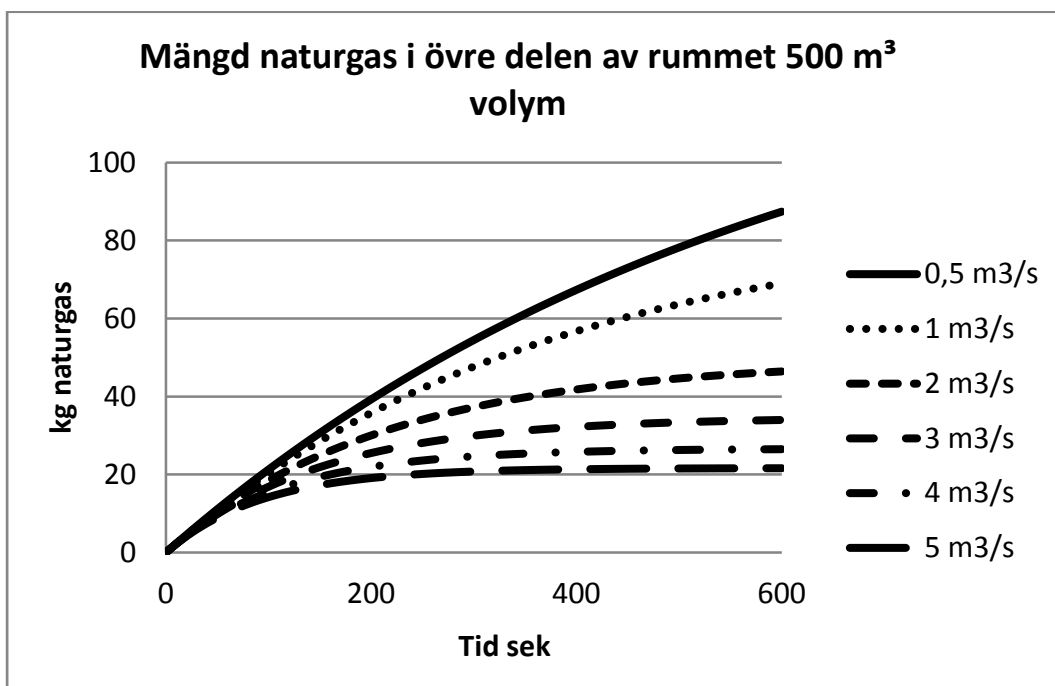
$$\text{Vol\% naturgas i övre skiktet} = \{(Q_{gas}/(Q_{gas} + Q_{fläkt})) * (1 - \exp(-(Q_{gas} + Q_{fläkt}) * t/V))\}$$

Nedan visas hur gaskoncentrationen för läckage vid 150 bars tryck i Figur 19, 21, 23 och kg naturgas ackumulerad det övre gaslagret i Figur 20, 22, 24 varierar med tiden för 500, 1000 och 4000 m³ volym i övre gasskiktet. I Figur 25 och 26 visas motsvarande data för 10 bars tryck.

5.1 Högtryck 150 bar, volym 500 m³



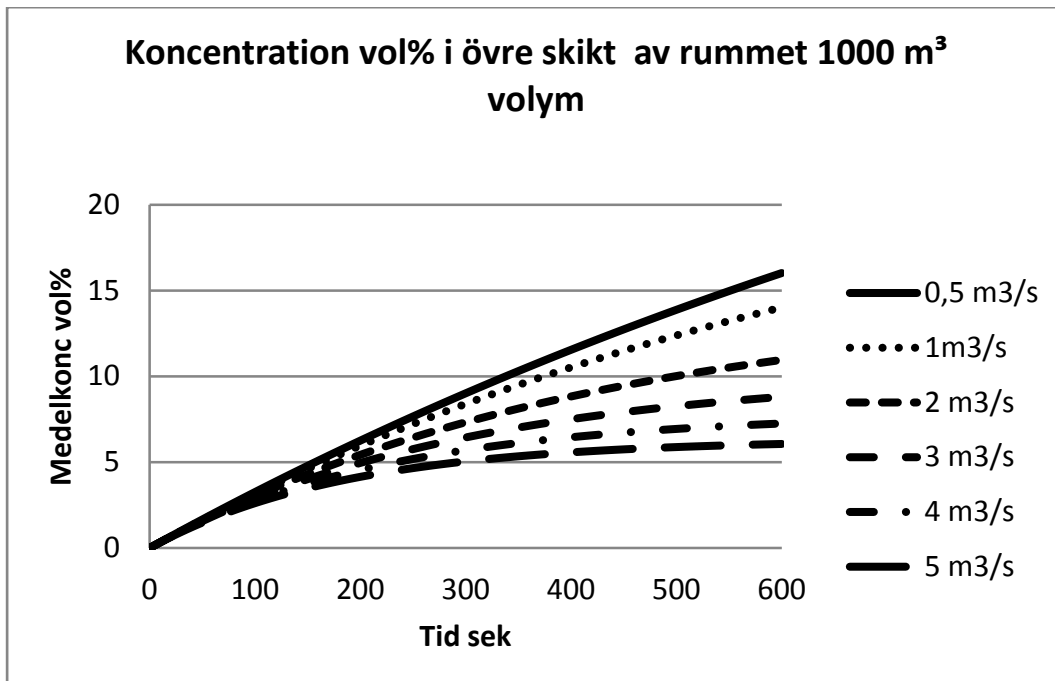
Figur 19 Medelkoncentration i övre skiktet vid 500 m³ volym.



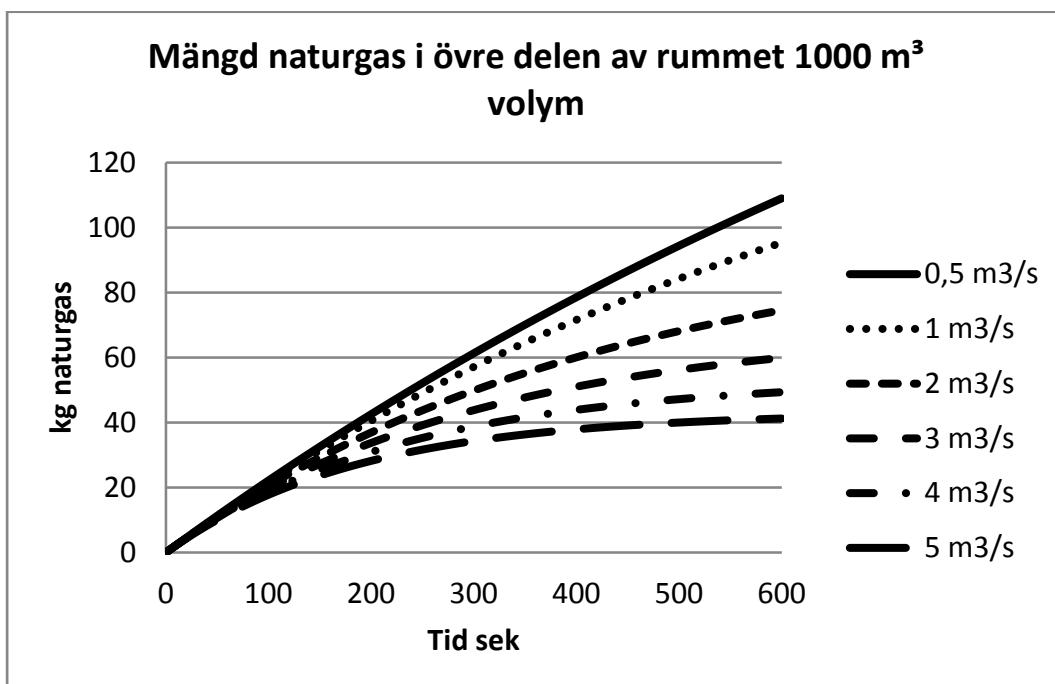
Figur 20 Mängd naturgas i övre skiktet med 500 m³ volym.

Den undre brännbarhetsgränsen passeras efter c:a 80-150 sekunder. Volymen innehåller då 15-20 kg naturgas. Efter 10 minuter innehåller volymen 20-80 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort.

5.2 Högtryck 150 bar, volym 1000 m³



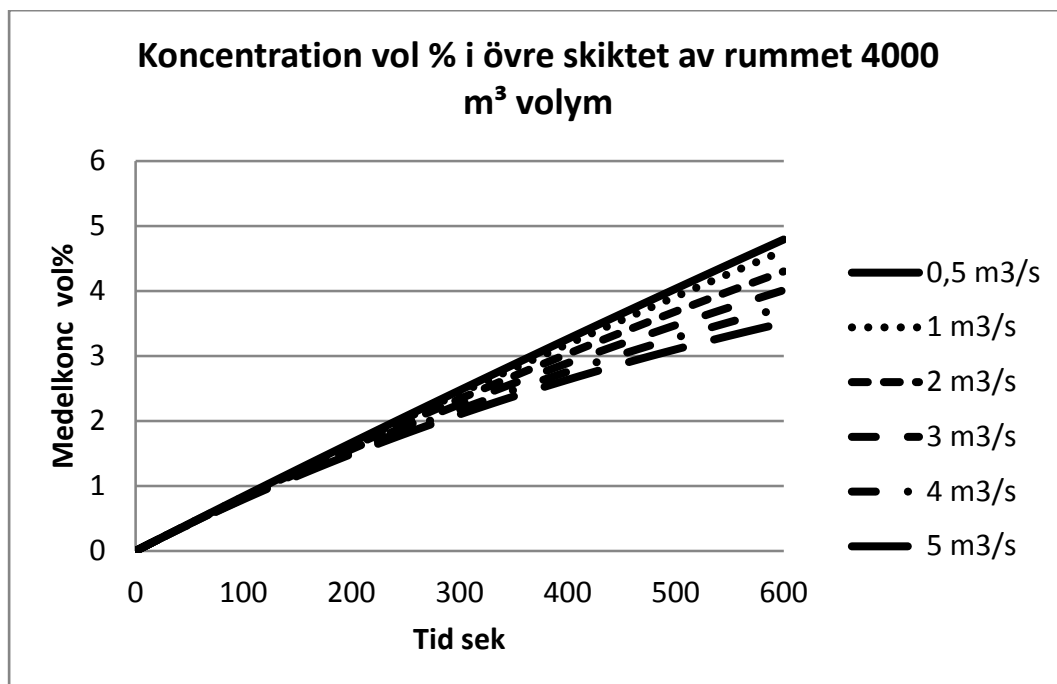
Figur 21 Medelkoncentration i övre skiktet vid 1000 m³ volym.



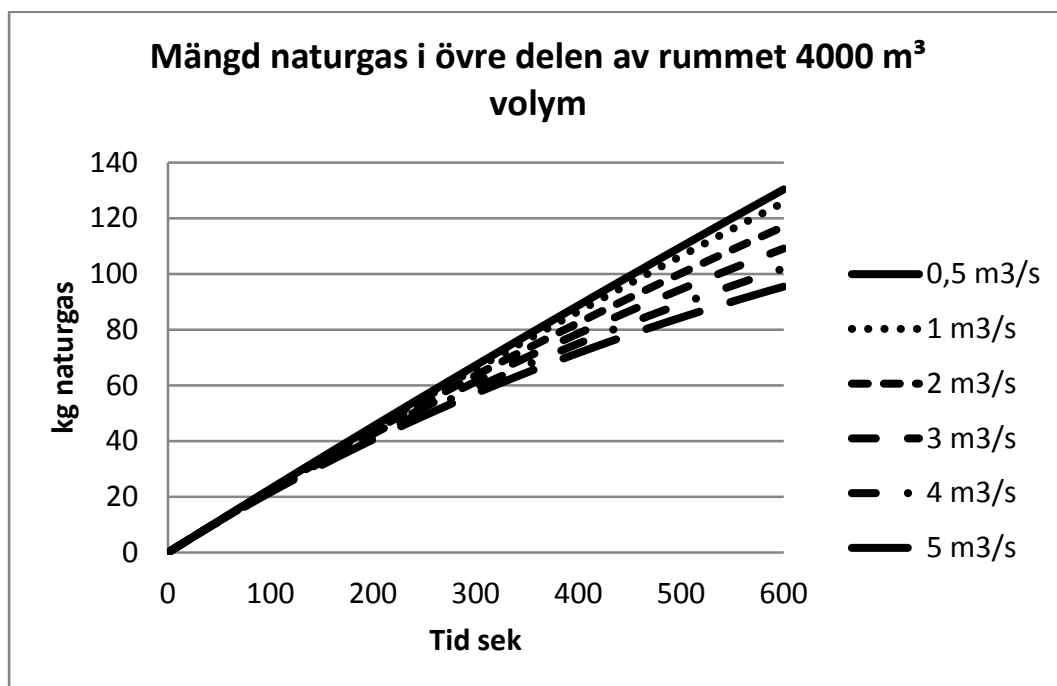
Figur 22 Mängd naturgas i övre skiktet med 1000 m³ volym.

Den undre brännbarhetsgränsen passeras efter c:a 150-300 sekunder. Volymen innehåller då c:a 30kg naturgas. Efter 10 minuter innehåller volymen 40-100 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort. Koncentrationen är i stort sett under den övre brännbarhetsgränsen (c:a 15 vol%) under hela förloppet.

5.3 Högtryck 150 bar, volym 4000 m³



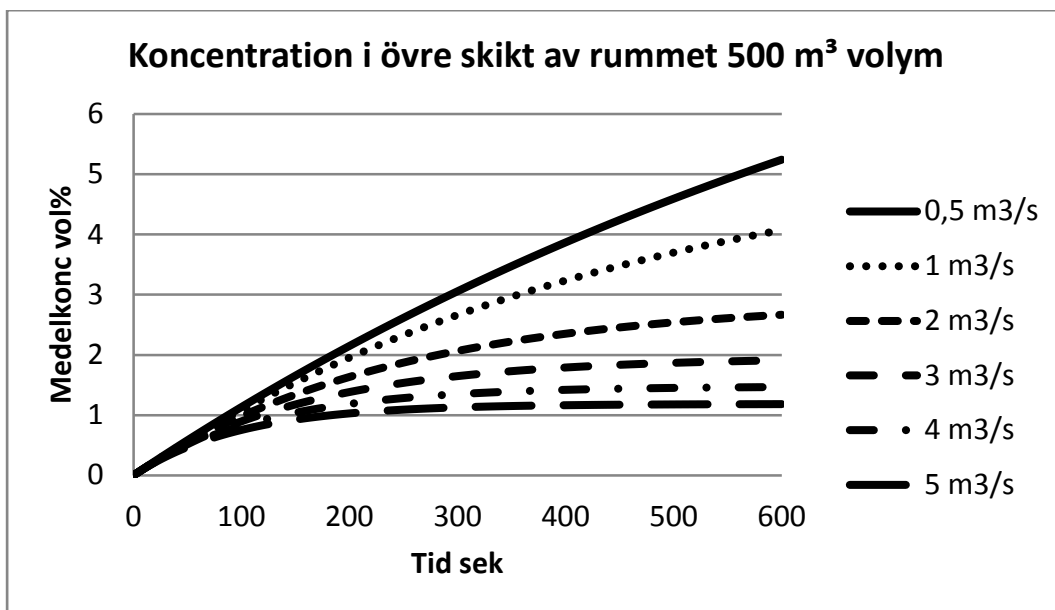
Figur 23 Medelkoncentration i övre skiktet vid 4000 m³ volym.



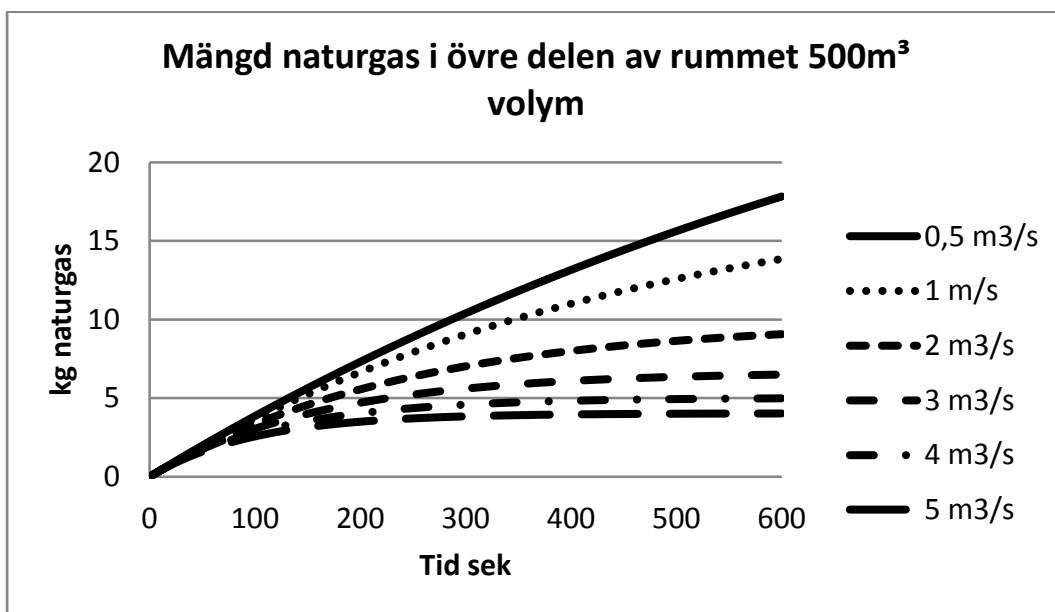
Figur 24 Mängd naturgas i övre skiktet med 4000 m³ volym.

Efter 10 minuter innehåller volymen 100-130 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort. Koncentrationen är under den undre brännbarhetsgränsen (c:a 5 vol%) under hela förloppet.

5.4 Tryck 10 bar, volym 500 m³



Figur 25 Medelkoncentration i övre skiktet vid 500 m³ volym.



Figur 26 Mängd naturgas i övre skiktet med 500 m³ volym.

Den undre brännbarhetsgränsen passeras efter ca 10 minuter minimal ventilation, 0,5 m³/s. Efter 10 minuter innehåller volymen 4 -18 kg naturgas beroende på hur mycket som ventileras bort. Koncentrationen är under den undre brännbarhetsgränsen (c:a 5 vol%) under hela nästan hela förloppet.

5.5 Sammanfattning

1. Överslagsberäkningarna tar inte hänsyn till att:

- Koncentrationsfördelningen inte är jämn i det övre lagret.
- Koncentrationsfördelningen inte tar hänsyn till hur nära utsläppet ligger i förhållande till ventilationsschakten.
- Annan brand i buss påverkar resultatet.
- Gaserna i det övre lagret i terminalen kan sprida sig utanför de gasvolymerna som antagits.

2. Överslagsberäkningarna vid ett utsläpp vid 150 bar visar att:

- Naturgaskoncentrationen i ventilationsschakten i närheten av utsläppet kommer att överskrida den undre brännbarhetsgränsen en kort tid efter utsläppet.
- Explosionsskyddade ventilationsschakt bör användas.
- Explosiva områden kommer att utbreda sig längs taket vilket motiverar ex-klassad takbelysning.
- Vid en eventuell antändning av gaserna i det övre lagret kommer det att finnas relativt stora mängder naturgas i lagret beroende av ventilationsgraden. För 500 m³ volym i storleksordning 20-90 kg, för 1000 m³ volym i storleksordning 40-110 kg och för 4000 m³ volym i storleksordning 100-130 kg för ventilation mellan 0,5 – 5 m³/s d.v.s. 1800 – 18000 m³/timmen i den begränsade volymen (500-4000 m³).
- Hela denna mängd naturgas i kg kommer dock inte att finnas inom brännbarhetsgränserna.

3. Överslagsberäkningarna vid ett utsläpp vid 10 bar visar att:

- Gaskoncentrationen efter 10 minuter inte når upp till brännbarhetsgränsen vid en volym på övre skiktet som är större än 500 m³ även om ventilationen endast är 0,5 m³/s.
- Lokalt vid ventilationsschaktet kan det finnas koncentrationer som motiverar ex-klassade fläktar.
- Explosiva områden kommer lokalt att utbreda sig längs taket vilket motiverar ex-klassad takbelysning.
- Vid en eventuell antändning av gaserna i det övre lagret kommer det att finnas omkring 4-18 kg naturgas i lagret beroende av ventilationsgraden. Hur mycket av denna mängd som finns inom brännbarhetsområdet är svår att uppskatta.

4. Förslag till grund för bedömning av tryckverkan

- Vid läckage vid 150 bar bör det finnas i storleksordning 40 kg antändbar naturgas. Vid läckage vid 10 bar bör det finnas i storleksordning 5 kg antändbar naturgas.

6 Tryckverkan vid fördröjd antändning

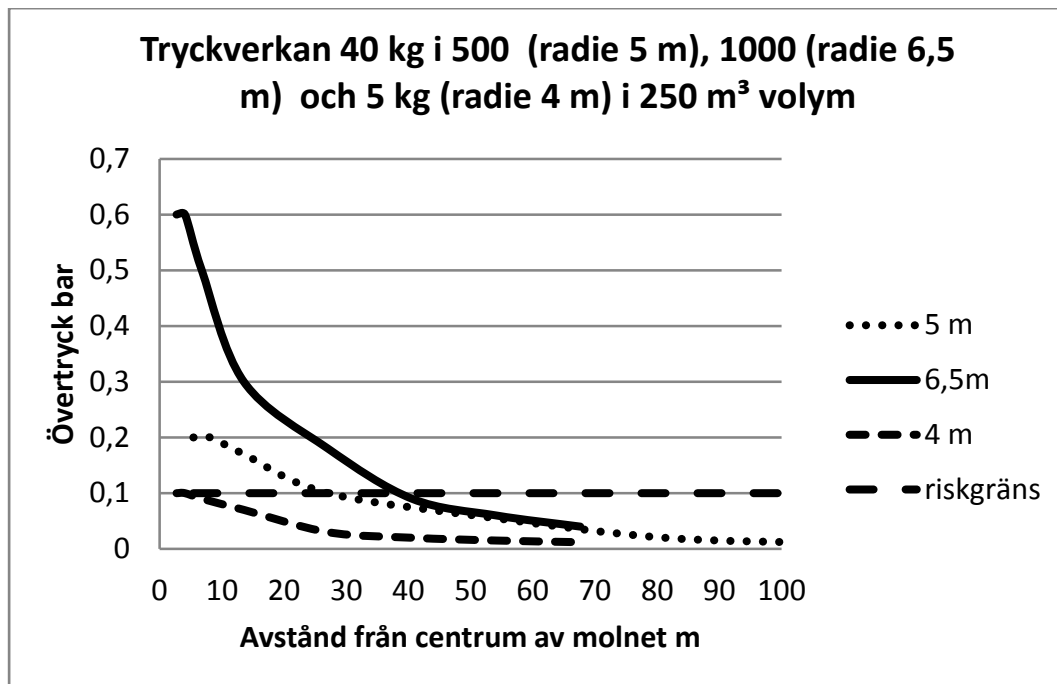
Beräkningarna följer den s.k. "multi-energy method" (van den Berg, 1985). Metoden är mer sofistikerad än TNT-ekvivalensmetoden. Osäkerheten i det beräknade övertrycket är dock relativt stort. För noggrannare beräkningar krävs avancerad CFD-simulering. För att en CFD simulering ska kunna utföras krävs ett avancerat CFD program med en mycket erfaren operatör. CFD simuleringar kräver dock en mängd olika indata i form av rand- och begynnelsevillkor (detaljerad information om geometri, detaljer om utsläppet, utsläppets läge i förhållande till ventilatorer etc.) vilka i det aktuella fallet kan vara svåra att precisera. CFD-beräkningar har genomförts och presenteras i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 5 [1].

Naturgas och biogas består till största delen av metan som har speciella egenskaper i förhållande till tyngre kolväten. Metan har en avsevärt högre självantändningstemperatur och ger i fria gasmolnexplosioner ingen övergång till detonation. För ett tyngre kolväte som propan (gasol) räknar man vanligtvis med att det behövs över 500 kg propan i det fria gasmolnet för en acceleration från deflagration till detonation.

I den metod som valts här, "multi-energy metoden" ingår i beräkningsalgoritmerna endast molnets radie och energiinnehåll d.v.s. ingen hänsyn tas till vilken typ av brännbar gas som finns i molnet. För att använda metoden måste man göra en del antagande:

- Terminalens volym är så stor i förhållande till volymen gasblandning att dess inverkan kan försummas.
- Inverkan av tak försummas och antändningen förutsätts ske centralt i ett sfäriskt moln.
- Ingen information om turbulensalstrande föremål i gasvolymen föremål ingår i beräkningsmodellen.
- Gasvolymen i vilken naturgasen fördelats varieras för att täcka in olika medelkoncentrationer i gasvolymen.
- För att få en konservativ bedömning användes även gasvolymen med en gaskoncentration under stökiometri.
- För 40 kg valdes volymerna till 500 och 1000 m³. 500 m³ motsvarar en gaskoncentration metan på 11,8 vol% vilket är över stökiometri (9,5 vol%) och 1000 m³ motsvarar en gaskoncentration på 5,9 vol% vilket är under stökiometri.
- Ju större volym som antas desto högre blir explosionstrycket d.v.s. det beräknade trycket för en stökiometrisk blandning skulle hamna mellan kurvorna för 500 och 1000 m³.
- För 5 kg valdes 250 m³ volym som motsvarar en gaskoncentration av c:a 3 vol% vilket är under brännbarhetsgränsen. Det medför att det beräknade trycket är en konservativ skattning.

I Figur 27 visas beräknat tryck för olika avstånd från gasmolnets centrum.



Figur 27 Tryckverkan av explosion på olika avstånd från centrum på gasmolnet.

6.1 Sammanfattning

- Beräkningarna är behäftade med stor osäkerhet.
- Stora utsläpp kan ge, för människor, skadliga tryckökningar på ett tiotal meter från centrum av gasmolnet.
- Den involverade gasvolymen påverkar tryckökningen avsevärt.
- Mindre utsläpp ger relativt ofarliga tryckhöjningar.
- Utöver tryckökningen utgör värmepåverkan från flammorna från explosionen en fara för människa och material.
- I samband med explosionen utvidgas molnets volym en faktor 5-7 .
- Då gaserna inte kan expandera uppåt pga. taket sker expansionen i huvudsak nedåt och i sidled.
- En 1000 m³ volym brännbar gas blir efter förbränning ca 5000-7000 m³ varm gasvolym som sprider sig nedåt och i sidled från centrum av gasmolnet.

7 Gränsvärden för värme- och tryckskada

Följande kapitel anges olika gränsvärden för strålning och tryck. I tabellerna anges konsekvenserna för olika nivåer av strålning och tryck.

Tabell 2 Human injuries at different thermal radiation intensity^v.

Heat flux (kW·m²) Acceptable limit for prolonged exposure.	Effects on materials	Effects on humans
1.6		Acceptable limit for prolonged exposure.
4		No lethality. 2nd degree burns probable. Pain after exposure of 20 s.
12.5	Minimum intensity for ignition, and melting of plastic tubes.	1% lethality in 1 min. 1st degree burns in 10 s.
25	Minimum intensity for ignition of wood in prolonged exposure.	100% lethality in 1 min. Serious injuries in 10 s.
37.5	Equipments damage. 100%	lethality in 1 min. 1% lethality in 10 s.

Tabell 3 Human injuries at different overpressures^{vi}.

Over pressure kPa	Injuries on people staying in a non-reinforced building
6.2-8.3	Very small risk of death or severe injuries. Mainly splinter injuries
6.9-13.8	No direct deaths or severe injuries are expected. Risk for temporary loss of hearing and splinter injuries.
24	Serious bodily injuries from fragments, debris, firebrands, splinter or other objects. Approximately 2% risk for eardrum rupture.
55	Serious injuries from blast, fragments, debris, and translation. 15% risk for eardrum rupture.
83	Fatal or serious injuries from direct blast, building collapse, or translation. 100% risk of eardrum rupture.
186	Fatal injuries by blast, being stuck by debris, or impact against hard surfaces.

Tabell 4 Extent of Damage as a Function of the Overpressure of the Shock Wave^{vii}.

Object	Effect	Pressure kPa
Glass Panes	5 % fracture	0,7-1
	50 % fracture	1,4-3
	100% fracture	3-6
Buildings		
glass window	Destruction	3-7
tiles	Movement	3 - 5
doors and window frames	Destruction	6 - 9
wall construction	Destruction 50-70%	35-80
pillars	Destruction	80-260
Large trees	Destruction	50-100
Railway cars	Derailment limit	80-190

8 Referenser

ⁱ Fires, explosions, and toxic gas dispersion (Effects calculation and risk analysis), Marc J. Assael and Konstantinos E. Kakosimos, CRE Press 2010

ⁱⁱ ALOHA beräkningsprogram av FEMA (Federal Emergency Agent) USA

ⁱⁱⁱ An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards; *B.J Lowesmith, G. Hankinson, M.R. Acton and G. Chamberlain*, , Process Safety and Environmental Protection, 85 (2007), pp.207-220

^{iv} Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures, *Barbara Joan Lowesmith*, Geoffrey Hankinson*, Process Safety and Environmental Protection 90 (2012) 108–120

^v World Bank, 1988, "Techniques for Industrial Assessing Hazards - A Manual", World Bank Publications, Technica Ltd

^{vi} DoD (2008) Ammunition and explosives safety standards. DoD 6055.09-STD, US Department of Defense, Washington DC.

^{vii} Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersion, Effects and Risk Analysis, M.J Assael and K.E. Kakosimos CRC Press 2010.

9 Bilagor

Ref. Nr	Namn	Titel	Version/Datum
1	X4-RA-800-0101_bilaga 5	CFD beräkningar GexCon	-



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Bilaga 2 – Konsekvensberäkningar litet och mellan håll

Stockholm

2016-09-20

Innehåll

1	Konsekvensberäkningar vid gasutsläpp vid 150 och 10 bars tryck med läckagediametrar 1,9 och 0,75 mm	3
1.1	Konsekvenser vid utsläpp i det fria	3
1.2	Konsekvenser vid utsläpp i en halvsluten volym inne i motorutrymmet eller i inneslutningen för gasflaskor på taket.....	5
2	Utsläppsberäkningar vid 150 och 10 bars tryck med 1,9 och 0,75 mm hål.	6
3	Dispersion av utsrömmande gasjet vid 150 och 10 bar med 1,9 och 0,75 mm hål	8
4	Strålningsberäkning från jetflammar.....	13
5	Referenser	16

Ref. Nr	Namn	Titel	Version/Datum
1	X4-RA-800-0101_bilaga 1	Konsekvensberäkningar grovanalys	-

1 Konsekvensberäkningar vid gasutsläpp vid 150 och 10 bars tryck med läckagediametrar 1,9 och 0,75 mm

Utsläppsmängder enligt avsnitt 2 redovisas i tabell 1. Utsläppen motsvarar scenarierna mellan och litet hål på högtrycks- respektive lågtryckssidan.

Tabell 1 Utsläpp vid olika flasktryck och håldiametrar.

Scenario	150 bar 1,9 mm	150 bar 0,75 mm	10 bar 1,9 mm	10 bar 0,75 mm
Utsläpp kg/s initialt	0,07	0,015	0,005	0,0008

Utsläppen kan dels ske i det fria eller i en halvsluten volym inne i motorutrymmet eller i inneslutningen för gasflaskor på taket.

1.1 Konsekvenser vid utsläpp i det fria

1.1.1 Antändbart område

Enligt avsnitt 2 blandas den brännbara gasen med luft och når brännbarhetsgränsen enligt tabell 2. Om en antändningskälla finns i det brännbara området kan jetstrålen antändas och ge en jetflamma.

Utsläppen är dock försmå för att utomhus, genom recirkulation, kunna bygga upp en större gasvolym i längdled och sidled än de avstånd som anges i tabell 2.

Tabell 2 Avstånd till brännbarhetsgränsen, 5 vol%.

Scenario nr.	Scenariobeskrivning	Avstånd (m) i längdled till brännbarhetsgränsen 5 vol%	Avstånd (m) i sidled till brännbarhetsgränsen 5 vol%
1	150 bar 1,9 mm hål	1,8	0,1
2	150 bar 0,75 mm hål	0,7	0,04
3	10 bar 1,9 mm hål	0,45	0,025
4	10 bar 0,75 mm hål	0,2	0,01

1.1.2 Flamlängd

Enligt beräkningar av flamlängden i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1] kommer flamlängden att bli en faktor 2 gånger de avstånd som redovisas i tabell 2. I tabell 3 redovisas uppskattade flamlängder.

Tabell 3 Flamlängd vid olika flasktryck och håldiametrar.

Scenario	150 bar 1,9 mm	150 bar 0,75 mm	10 bar 1,9 mm	10 bar 0,75 mm
Flamlängd meter	3,6	1,4	0,9	0,4

1.1.3 Riskavstånd människa

Flammorna kommer att medföra en risk i närområdet orsakad av konvektiv värmeöverföring och strålning. Den konvektiva värmeöverföringen når längst i flammans längdled och strålningen längst i sidled. I tabell 4 uppskattas avstånd för konvektiv (flammorna har böjts av uppåt) och strålningsskada för människa och i tabell 5 för organiska material. Strålningsberäkningar för jetflammorna för scenario 1-4 redovisas i avsnitt 4. Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av uppåt. I tabell 4 har det konvektiva riskavståndet grovt skattats till 5*flamlängden. Riskavstånden för strålning har satts till 2 kW/m² som acceptabel nivå för människa och 4 kW/m² som nivå för 2:a gradens brännsår efter 20 sekunder. Strålningsberäkningarna är konservativa med avseende på den antagna strålningsfraktionen, se Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1].

Tabell 4 Riskavstånd från jetflamma för människa.

Scenario	150 bar 1,9 mm	150 bar 0,75 mm	10 bar 1,9 mm	10 bar 0,75 mm
Konvektivt riskavstånd (m) Längdled	18	7	5	2
Konvektivt riskavstånd (m) Sidled	0,5	<0,3	<0,3	< 0,3
Strålning riskavstånd (m) 2 kW/m ² Längdled	4	2,0	1	0,4
Strålning riskavstånd (m) 2 kW/m ² Sidled	5	2,5	1,5	0,5
Strålning riskavstånd (m) 4 kW/m ² Längdled	2,5	1,2	0,6	0,25
Strålning riskavstånd (m) 4 kW/m ² Sidled	3,5	1,7	0,9	0,4

1.1.4 Riskavstånd organiska material

Det konvektiva riskavståndet är svårt att uppskatta då gaserna efter flammen har stor hastighet och hög temperatur. Ju längre man kommer från flammorna desto mer har den varma gasströmmen böjts av. I tabell 5 har det konvektiva riskavståndet grovt skattats till c:a 4*flamlängden. Riskavstånd för strålning har satts till 12,5 kW/m² vilket är den lägsta strålningsnivå som krävs för många organiska material för att de skall avge brännbara gaser. Det är således ett konservativt värde. Tiden till antändning vid 12,5 kW/m² är dock lång.

Tabell 5 Riskavstånd från jetflamma för organiska material.

Scenario	150 bar 1,9 mm	150 bar 0,75 mm	10 bar 1,9 mm	10 bar 0,75 mm
Konvektivt riskavstånd (m) Längdled	14	5	4	1,5
Konvektivt riskavstånd (m) Sidled	0,5	<0,3	<0,3	< 0,3
Strålning riskavstånd (m) 12 kW/m ² Längdled	1,2	0,6	0,3	< 0,2
Strålning riskavstånd (m) 12 kW/m ² Sidled	1,8	0,8	0,5	<0,2

1.2 Konsekvenser vid utsläpp i en halvsluten volym inne i motorutrymmet eller i inneslutningen för gasflaskor på taket

Sker utsläppet inne i en halvsluten volym kan recirkulation av gas i volymen bygga upp antändbara blandningar i hela volymen. Recirkulationen varierar kraftigt med ventilationen i volymen. Är bussens motor igång bedöms ventilationen i motorutrymmet vara stor varvid en stor del av gasen späds ut och ventileras bort. Är motorns kylfläkt frånslagen kan det bildas en antändbar gaskoncentration i motorhuset för alla utsläpp enligt scenarier 1-4. En antändning skulle medföra en explosion i motorutrymmet varvid en del plåtar troligtvis skulle kastas ut beroende på hur stor ventilationsyta som motorutrymmet har. En bedömning av riskavståndet för splitter-, tryck- och värmeskador är svår att göra. Riskavståndet för en människa skattas grovt till att vara ca 5-10 m.

2 Utsläppsberäkningar vid 150 och 10 bars tryck med 1,9 och 0,75 mm hål.

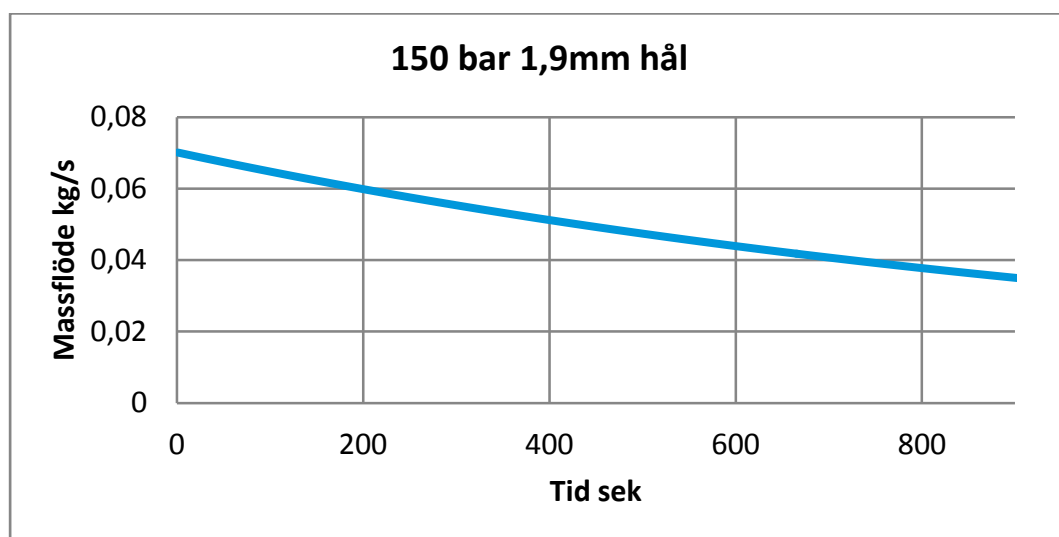
Utsläppsberäkningarna utfördes med samma formler¹ som använt i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1].

Beräkningar har utförts för två hålstorlekar, 1,9 mm och 0,75 mm vid 150 och 10 bars gastryck. Detta motsvarar mellan och litet hål på högtrycks- respektive lågtryckssidan.

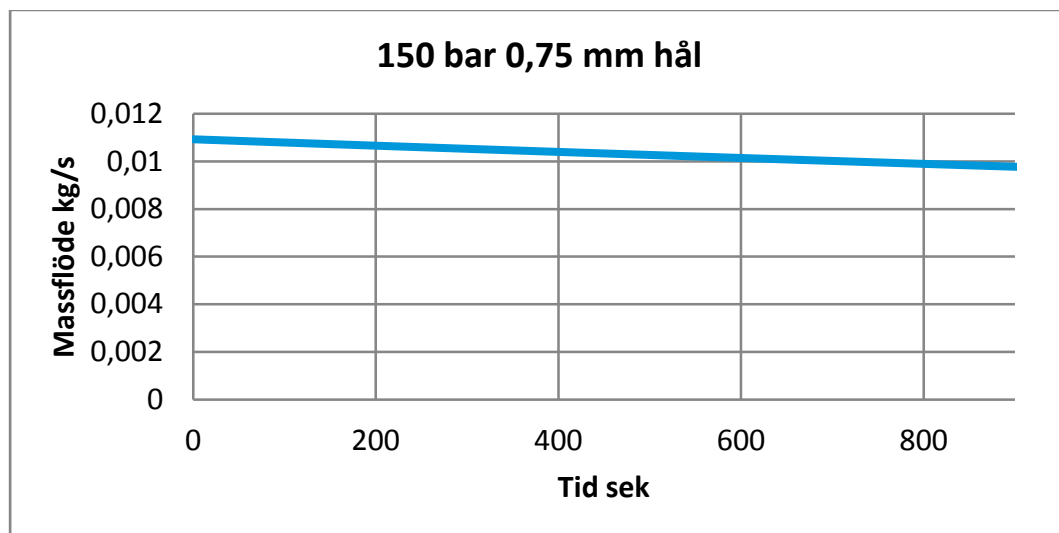
Resultaten redovisas i tabell 6 och figur 1-4.

Tabell 6 Utsläpp vid olika flasktryck och håldiametrar.

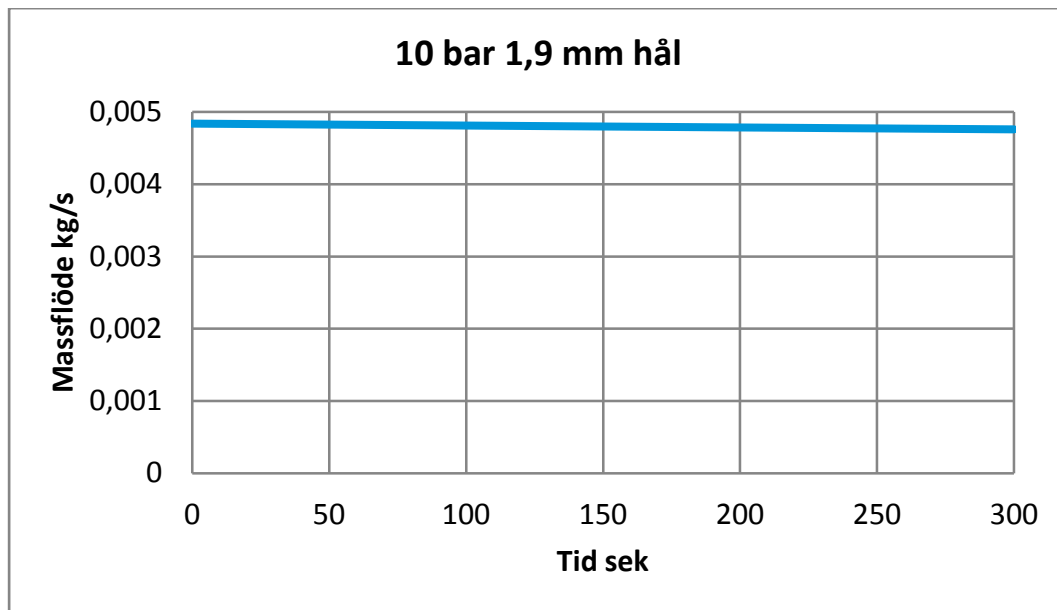
Scenario	150 bar 1,9 mm	150 bar 0,75 mm	10 bar 1,9 mm	10 bar 0,75 mm
Utsläpp kg/s initialt	0,07	0,015	0,005	0,0008



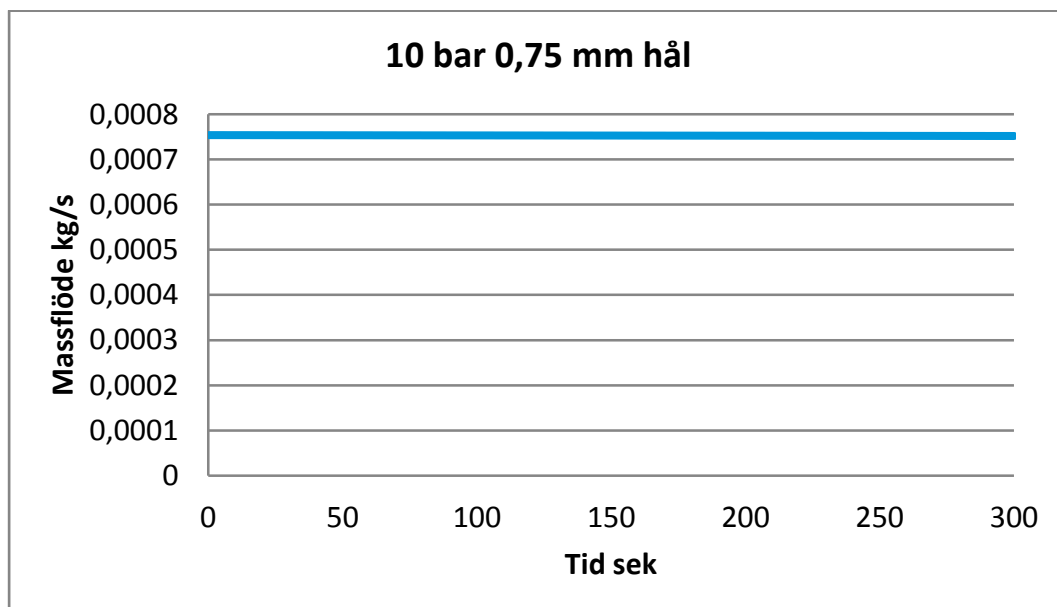
Figur 1 Scenario 150 bar, 1,9 mm hål.



Figur 2 Scenario 150 bar, 0,75 mm hål.



Figur 3 Scenario 10 bar, 1,9 mm hål.



Figur 4 Scenario 10 bar, 0,75 mm hål.

3 Dispersion av utströmmande gasjet vid 150 och 10 bar med 1,9 och 0,75 mm hål

Dispersionen är beräknad med Chen och Rodi's formel för jetdispersion. Osäkerheten i formeln har diskuterats i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1].

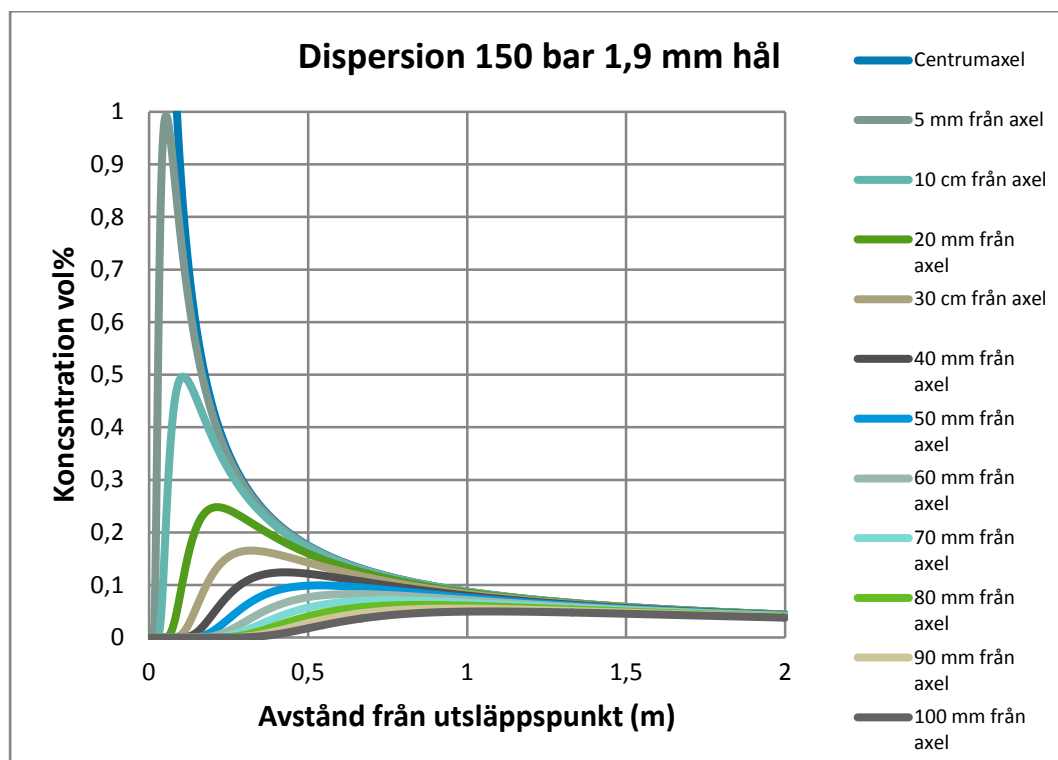
Beräkningar har utförts för två hålstorlekar, 1,9 mm och 0,75 mm vid 150 och 10 bars gstryck.

Resultaten redovisas i tabell 7 och figur 5-12.

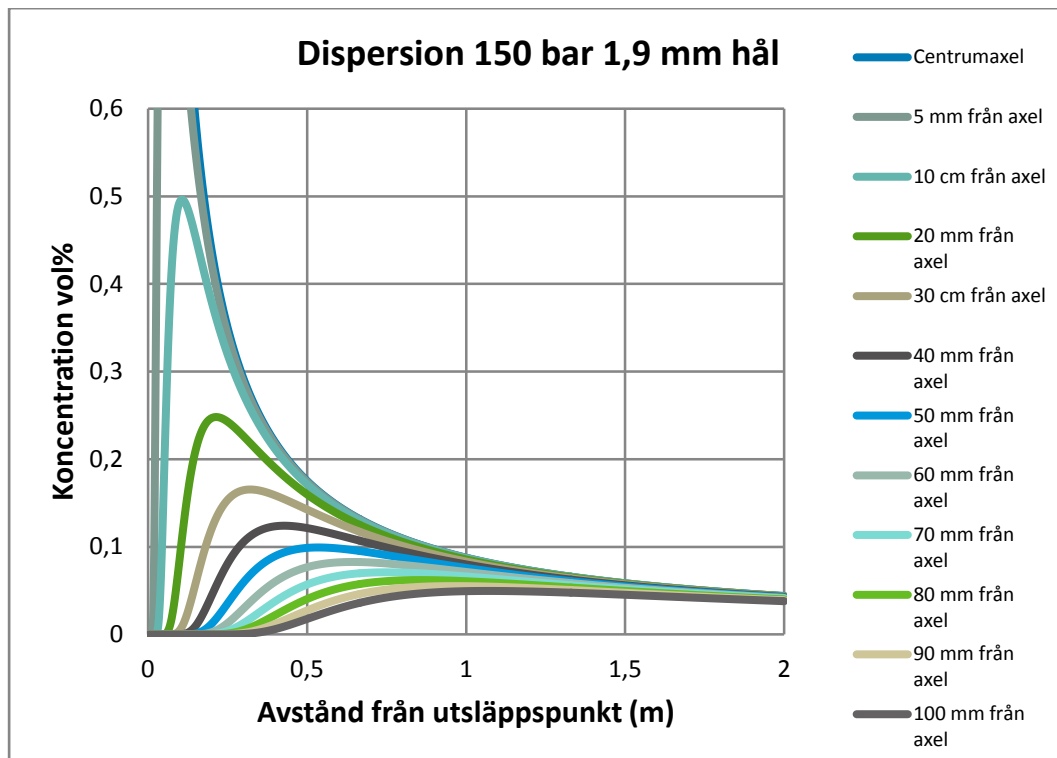
Tabell 7 Avstånd till brännbarhetsgränsen, 5 vol%.

Scenario nr	Scenariobeskrivning	Avstånd (m) i längdled till brännbarhetsgränsen 5 vol%	Avstånd (m) i sidled till brännbarhetsgränsen 5 vol%
1	150 bar 1,9 mm hål	1,8	0,1
2	150 bar 0,75 mm hål	0,7	0,04
3	10 bar 1,9 mm hål	0,45	0,025
4	10 bar 0,75 mm hål	0,2	0,01

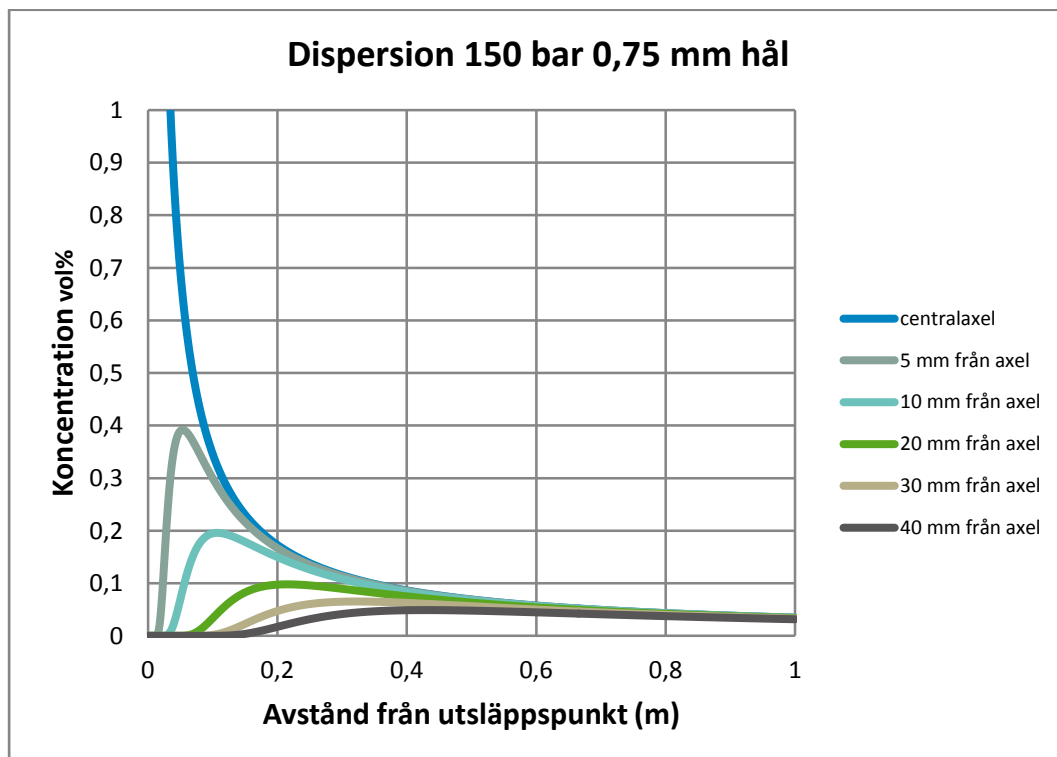
Antändbara blandningar kommer endast att finnas i omedelbar närheten av jetstrålen förutsatt att den inte träffar något föremål. Inne i ett halvslutet område med begränsad tillgång till luft kan genom recirkulation koncentrationer över brännbarhetsgränsen byggas upp.



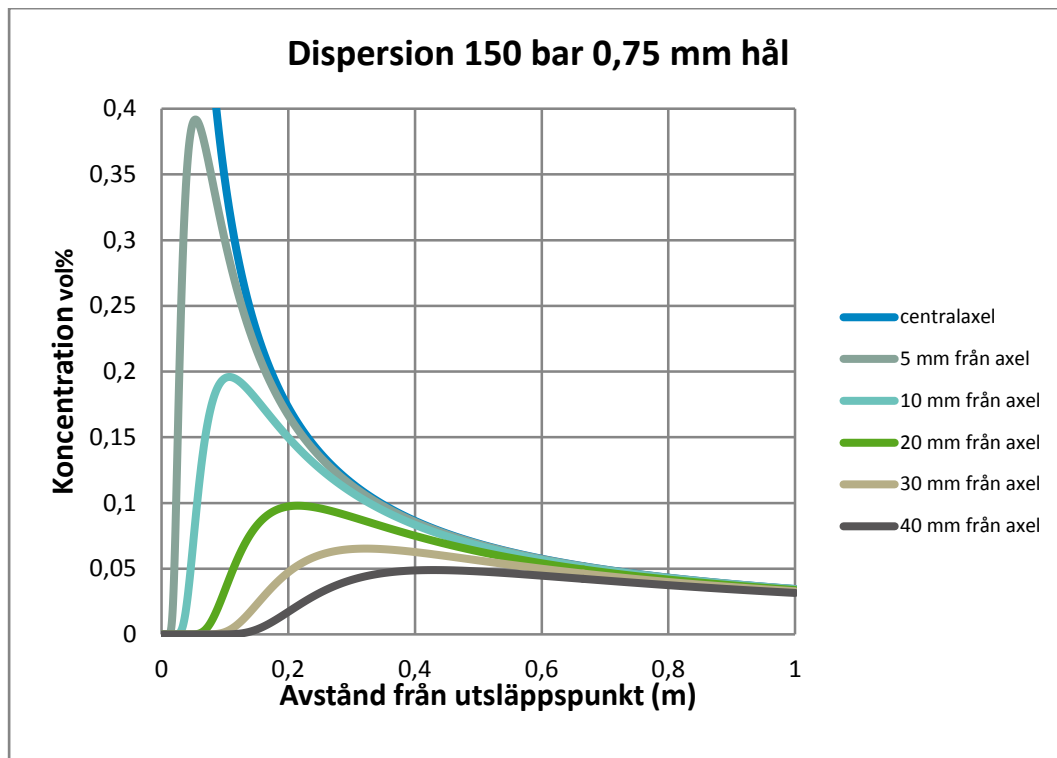
Figur 5 Scenario 1



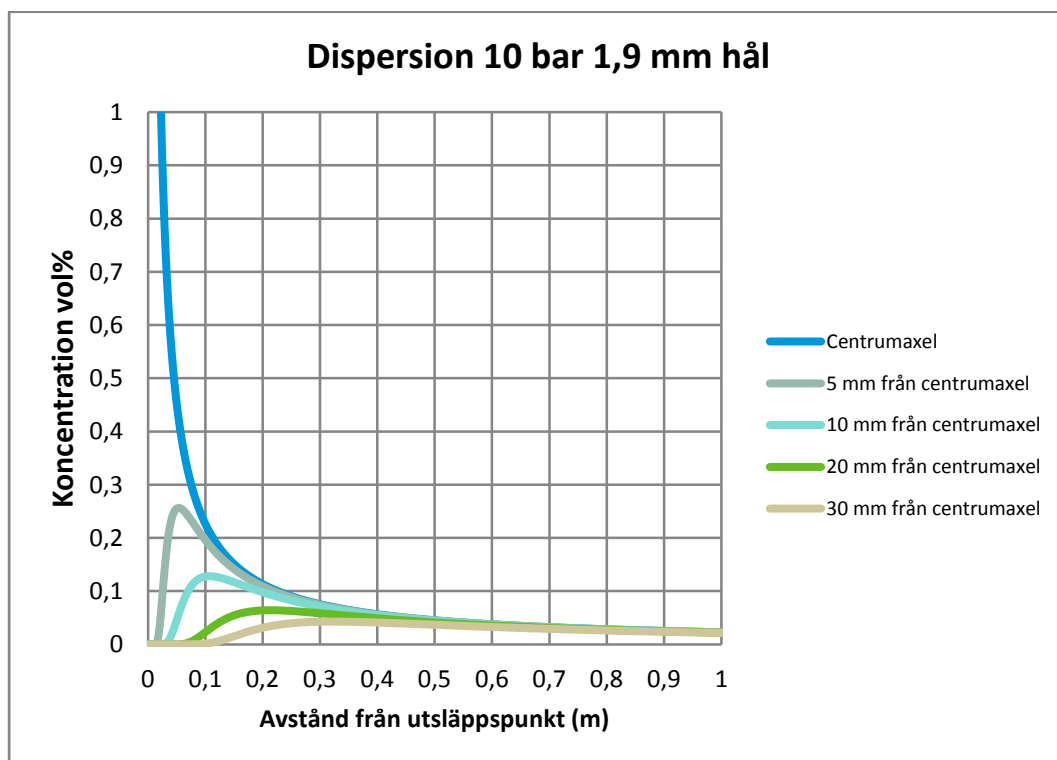
Figur 6 Zoomning av figur 5.



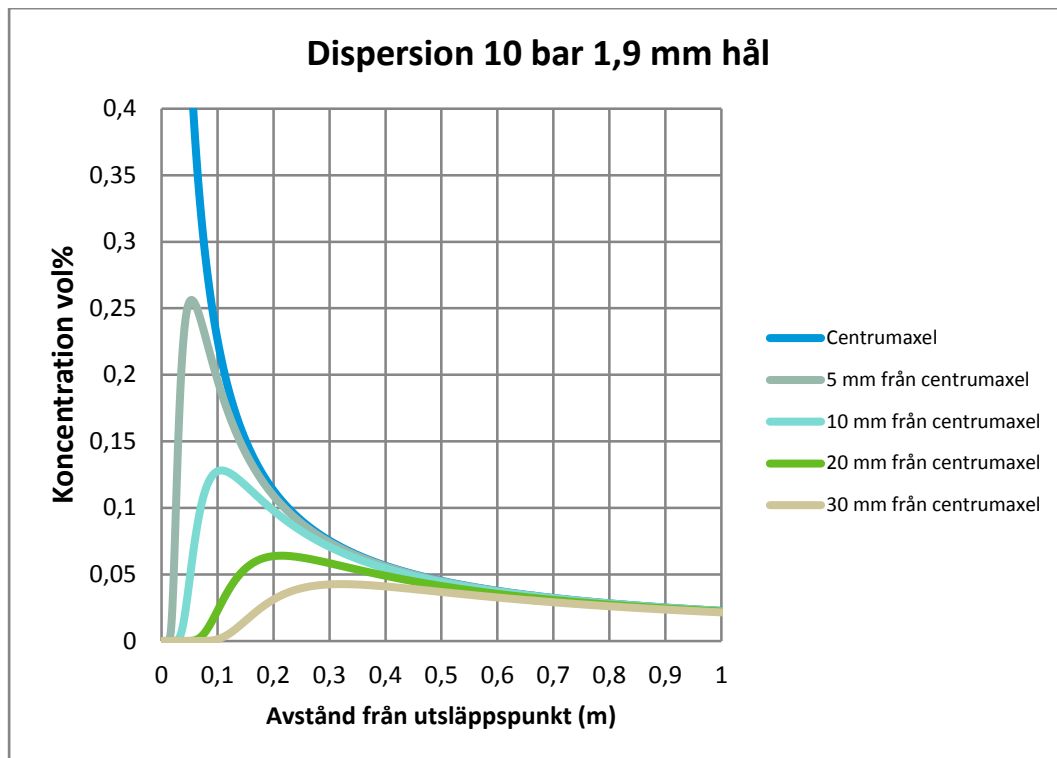
Figur 7 Scenario 2



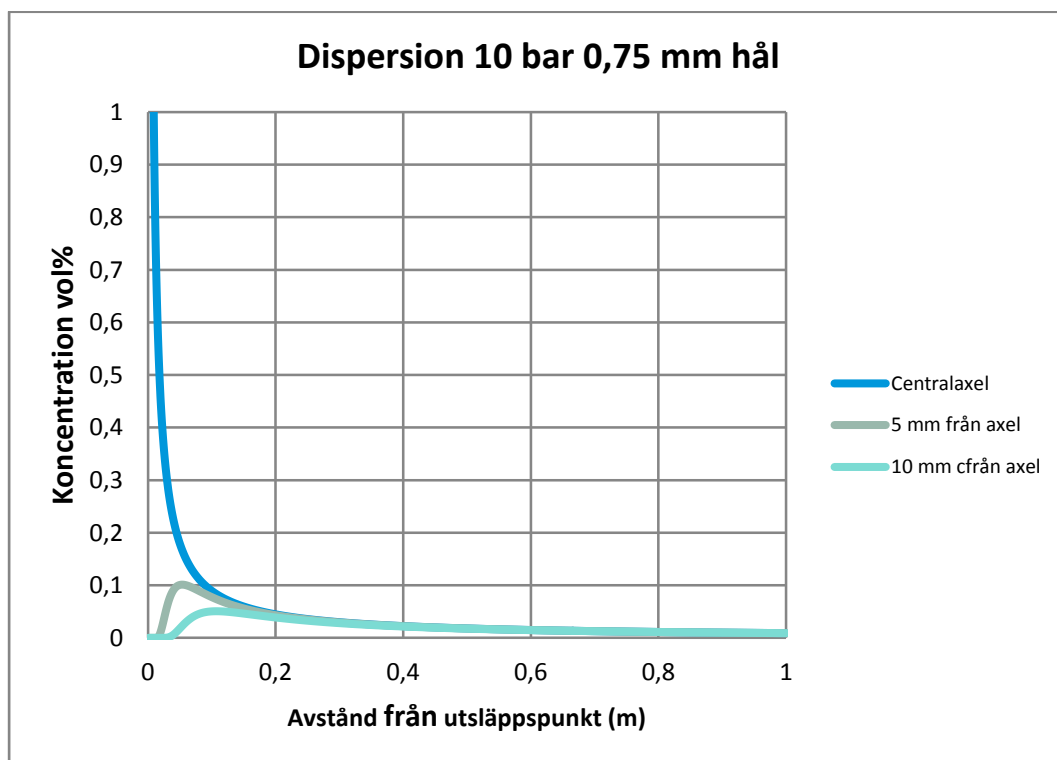
Figur 8 Zoomning av figur 7.



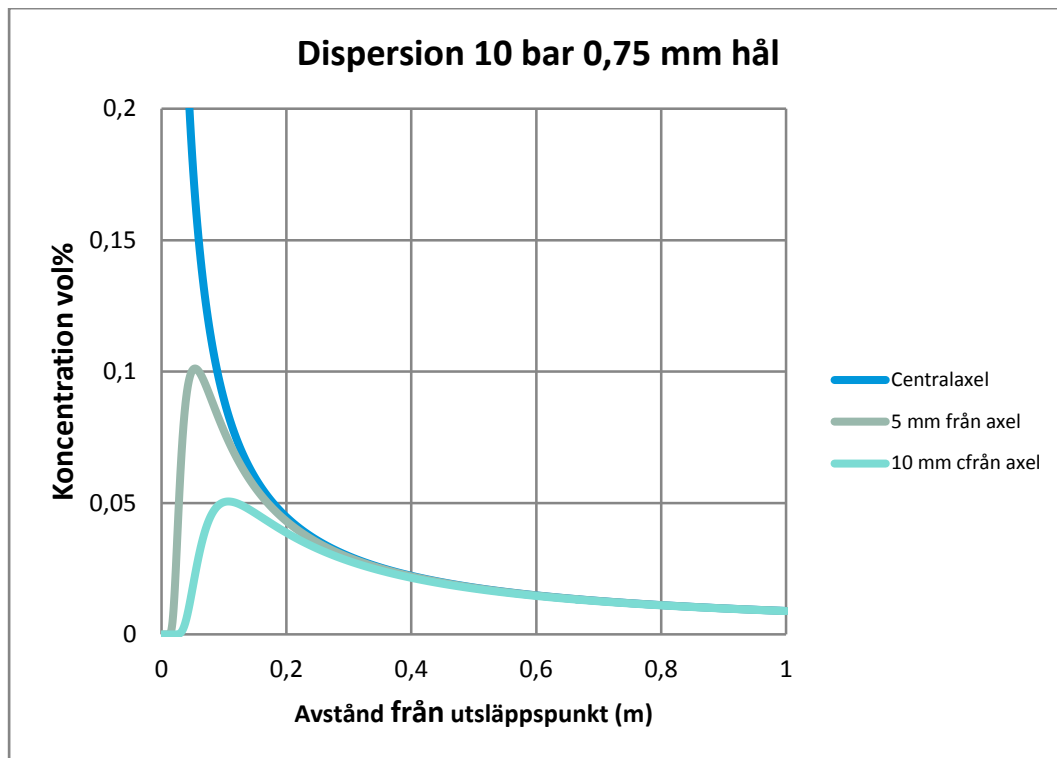
Figur 9 Scenario 3.



Figur 10 Zoomning av figur 9.



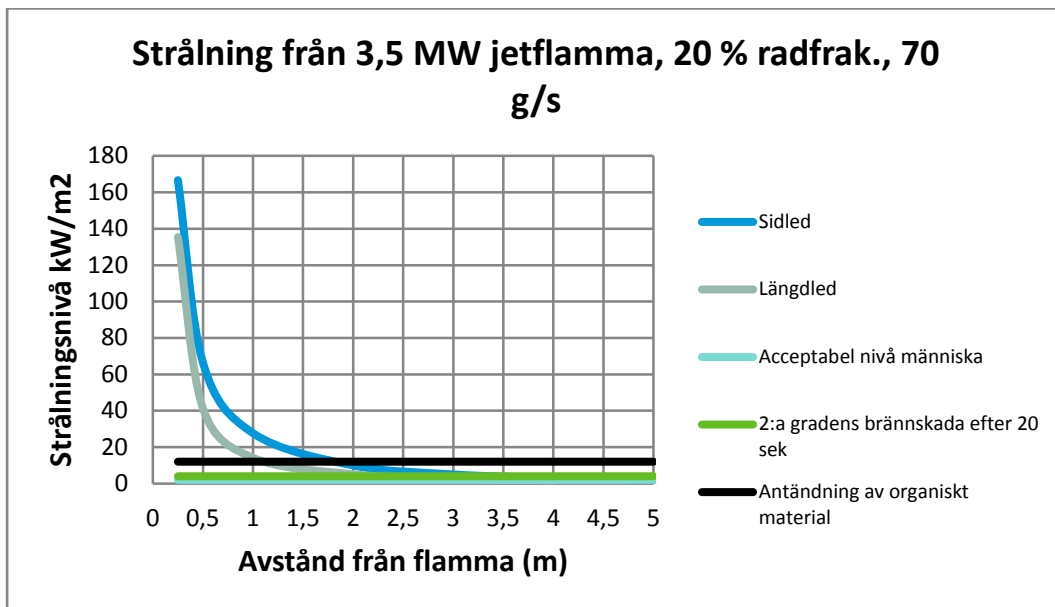
Figur 11 Scenario 4.



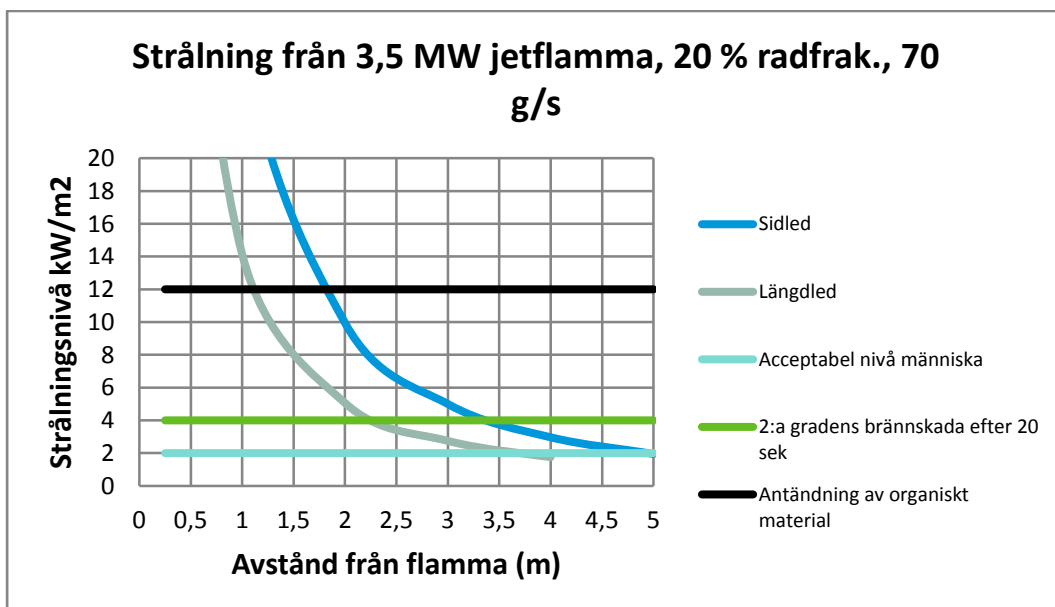
Figur 12 Zoomning av figur 11.

4 Strålningsberäkning från jetflammar

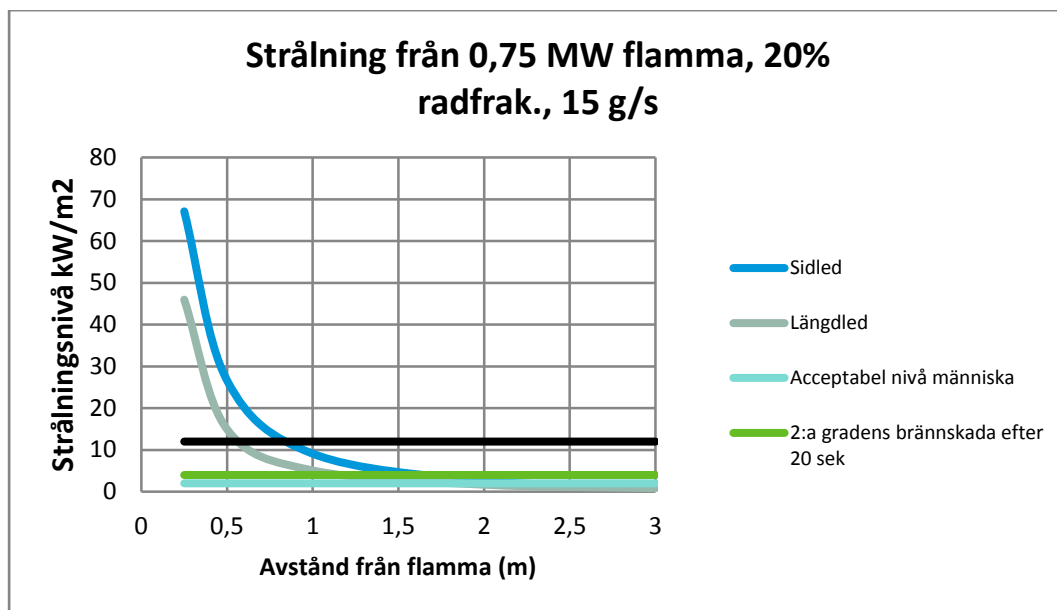
Vid beräkningarna har metoden med punktkällor använts. Den har enligt tidigare rapport, Riskanalys avseende bussar med fordonsgas – Bilaga 1 [1], visat sig ge likartade resultat som metoden som använder ytemissivitet och synfaktor. Strålningsfraktionen har valts till 20% vilket är ett konservativt värde, se Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1].



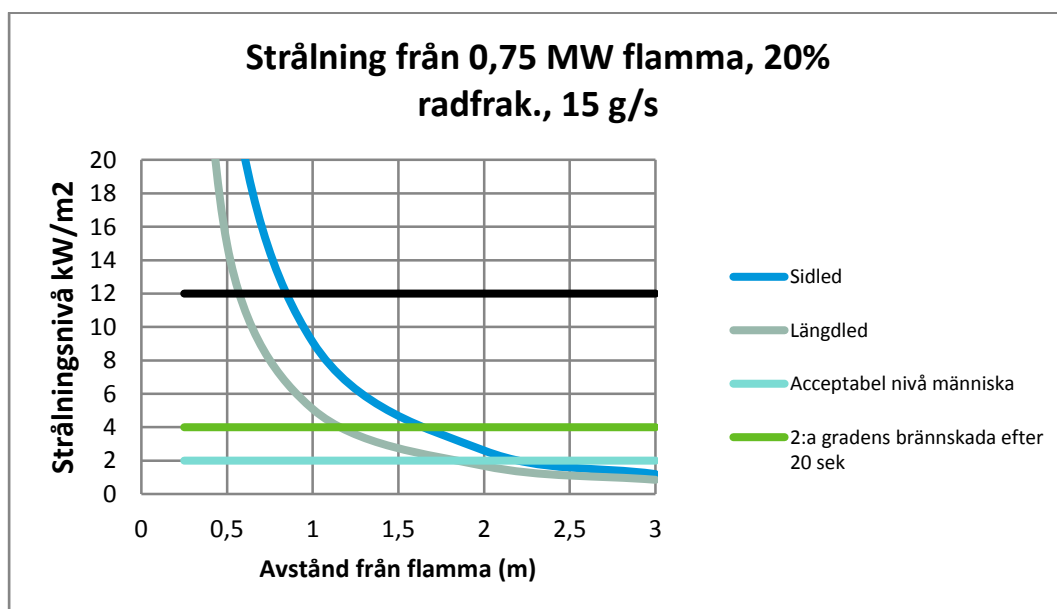
Figur 13 Strålning från 3,5 MW jetflamma, 20 % radfrak., 70 g/s.



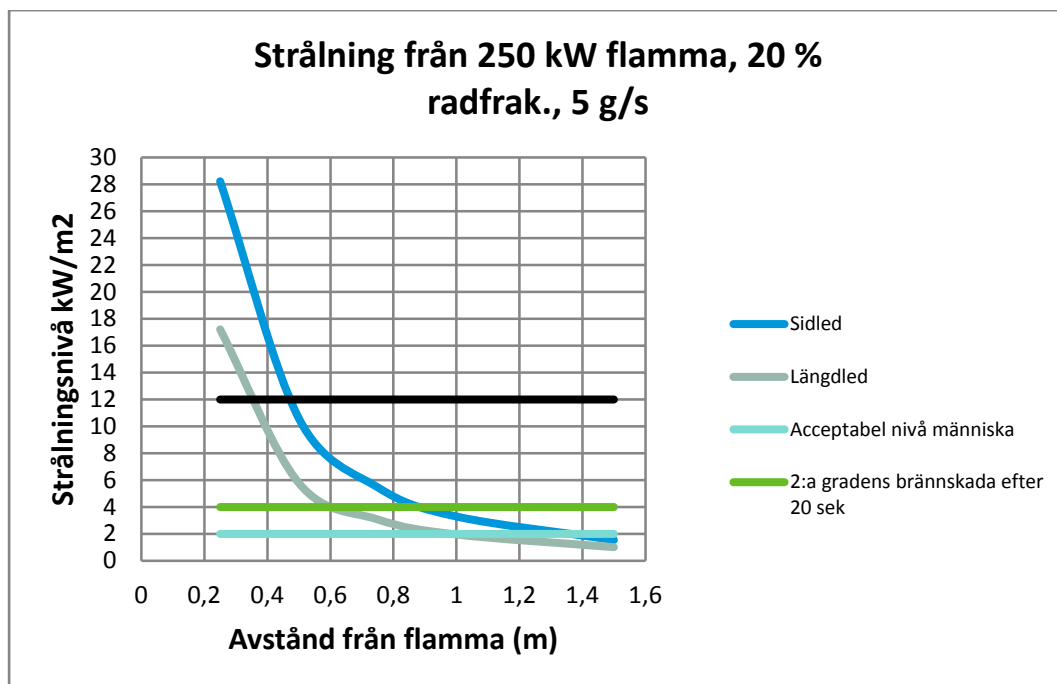
Figur 14 Inzoomad del av figur 13.



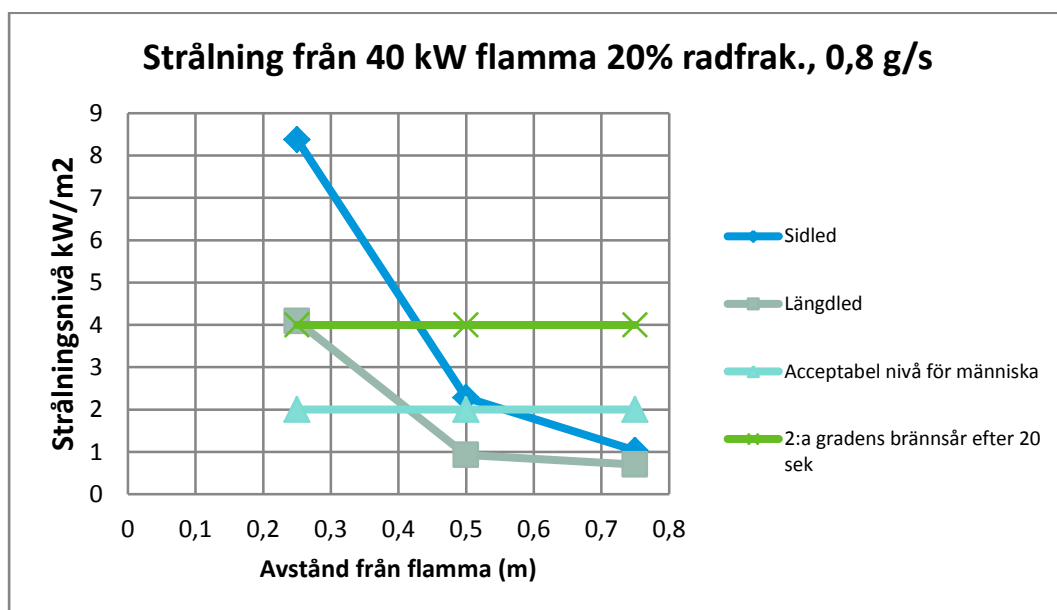
Figur 15 Strålning från 0,75 MW flamma, 20%



Figur 16 Inzoomad del av figur 15.



Figur 17 Strålning från 250 kW flamma, 20 %.



Figur 18 Inzoomad del av figur 17.

5 Referenser

¹ Fire, Explosions, and toxic gas dispersions” av Marc J. Assael och Konstantinos E. Kakosimons, CRE Press



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Bilaga 3 – Konsekvensberäkningar kärleksprängning

Stockholm

2016-09-20

Innehåll

1	Konsekvenser av kärlsprängning och större mekaniska defekter på gasflaskor	3
1.1	Gasutsläppet antänds och bildar ett eldklot s.k. fireball.....	3
1.2	Risk med fragment	4
1.3	Risk med störtvåg.....	4
2	Beräkning av strålning från verkan av en fireball på människa och material.....	7
2.1	Riskavstånd för att antändbara gaser bildas strålningen för Fireball.....	11
3	Referenser	12

Ref. Nr	Namn	Titel	Version/Datum
1	X4-RA-800-0101_bilaga 1	Konsekvensberäkningar från grovanalys	-

1 Konsekvenser av kärlsprängning och större mekaniska defekter på gasflaskor

En gasflaska med komprimerad gas som spricker eller om ett större hål slås upp i flaskan ger följande konsekvenser:

1. Utsläpp av brännbar gas. Gasutsläppet kan resultera i sekundära effekter som t.ex. en s.k. fireball, ett eldklot, där all gas förbränns på ett par sekunder med medföljande höga infallande strålningsnivåer för objekt som finns i närhet av eldkulan.
2. Kärlet brister och fragment kan slungas ut. Delar av gasens kompressionsenergi överförs till rörelseenergi hos fragment som kan bli projektiler som kan transporteras lång väg och skada det de träffar på sin väg.
3. Orsakar en stötvåg på grund av gasens expansion. Delar av kompressionsenergin övergår till rörelseenergi hos den utsläppta gasen och förorsakar en stötvåg som kan förstöra eller kasta iväg föremål.

Vanligtvis finns det två skäl till att en gasflaska sprängs, antingen blir övertrycket större än flaskans designtryck eller har flaskans hållfasthet försämrats.

Vanligaste orsak till att flaskans designtryck överskrids är överfyllning, uppvärmning där inte säkerhetsventilen utlöser och fel på någon tryckregulator.

Vanligaste orsak till att hållfastheten försämras är att flaskan oxideras, rostar, materialfel, nötning på grund av vibrationer eller kollision med annat objekt (fordonskollision).

I sammanfattningen nedan behandlas konsekvenserna 1, 2 och 3 separat.

1.1 Gasutsläppet antänds och bildar ett eldklot s.k. fireball

I avsnitt 2 redovisas konsekvenserna för människa och brännbara material på olika avstånd från en fireball som funktion av gasutsläppets storlek i kg.

Beräkningarna i avsnitt 2 är behäftade med osäkerhet främst beroende på att man inte kan förutsäga hur utsläppet ser ut dvs. hur flaskan brister. Bedömningen har fått göras med utgångspunkt från empiriska formler från gasutsläpp utomhus. På grund av osäkerheterna, främst på grund av skattningen av eldklotets geometriska utbredning och läge över marken har en säkerhetsfaktor 2 använts på riskavståndet för 10 och 20 kg utsläpp.

Sammanfattning:

- Tabell 1 nedan redovisar riskavstånd för oskyddad hud (2:a gradens brännskador) som funktion av mängden gas i flaskorna. Eldklotets varaktighet ansätts konservativt till 4 sekunder. Varaktigheten har beräknats till mellan 1,5 och 3,5 sekunder beroende på mängden gas i flaskorna.

Tabell 1 Riskavstånd för oskyddad hud (2:a gradens brännskador) som funktion av mängden gas i flaskorna.

Kg gas i flaska	10	20	40	60	80	100	120	150	175	200
Riskavst (m)	20-25	30	40	40-45	45-50	50-55	55-60	<70	<70	<70

- Motsvarande riskavstånd för organiska material (gränsen för att de skall avge brännbara gaser (piloted ignition) har i avsnitt 1 med en säkerhetsfaktor 2 skattats till 20-30 m vid ett utsläpp av minst 40 kg gas.

1.2 Risk med fragment

När en gasflaska brister frigörs den lagrade tryckenergin. Tryckenergin, Q , ges av:

$$Q = P \cdot V / (\kappa - 1)$$

vilket medför att en 20 respektive 50 liters metanflaska vid 200 bar har en tryckenergi av 1,25 respektive 3,13 MJ. Som sprängmedel motsvarar det 0,26 respektive 0,66 kg TNT (M_{TNT}). Vid 150 bar blir motsvarande sprängstyrka 0,2 respektive 0,5 kg. I jämförelse med kemisk energi är de små energiinnehåll, 1 kg metan har ett energiinnehåll av 50 MJ/kg och i flaskorna finns vid 200 bars tryck 2,7 respektive 6,8 kg metan.

Beroende hur kärlet brister kan tryckverkan få olika utfall.

Om endast ventilhuvudet brister blir all expansionskraft riktad åt ett håll. Är hålet stort, större än några cm^2 , blir den resulterande kraften så stor att flaskan riskerar slita sig från sin förankring och flyga som en projektil som kan nå hela busstunnelns längd och penetrera genom andra bussar eller avgränsningen mot vänthallen.

Hur många fragment som bildas varierar med från fall till fall. Små flaskor ger vanligtvis färre fragment, för gasflaskorna i bussar troligtvis mindre än 5.

Sammanfattning:

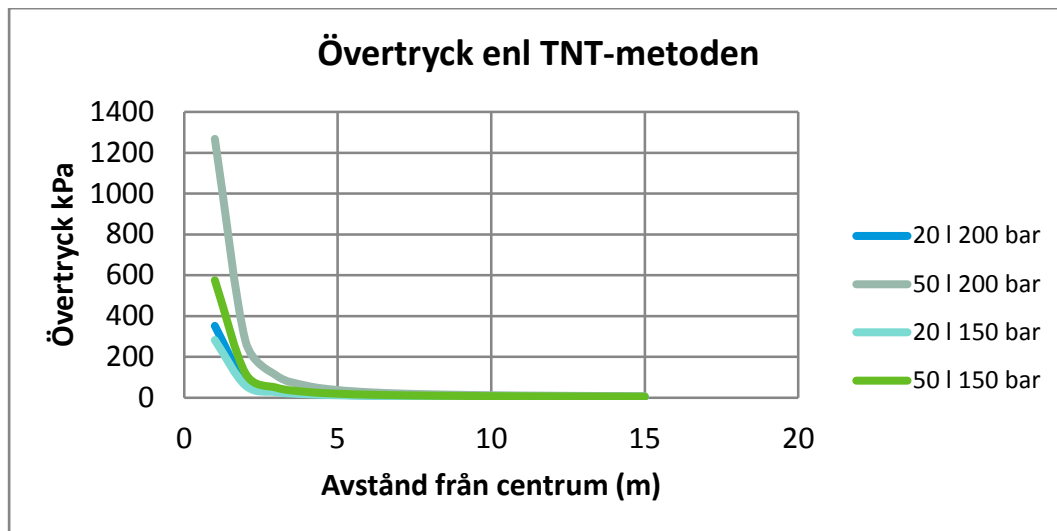
- Vid kärlsprängning eller större brott slungas fragment av olika storlekar lång väg från bussen upp till mer än 100 meter.
- Stora fragment som träffar för människa kan vara dödliga.
- Fragment kan i flaskornas närhet förstöra gasledningar och ventiler till andra närliggande gasflaskor och därmed öka utsläppet av brännbar gas.
- Stora fragment kan penetrera avskiljningen till vänthallen beroende på barriärens hållfasthet.

1.3 Risk med stötvåg

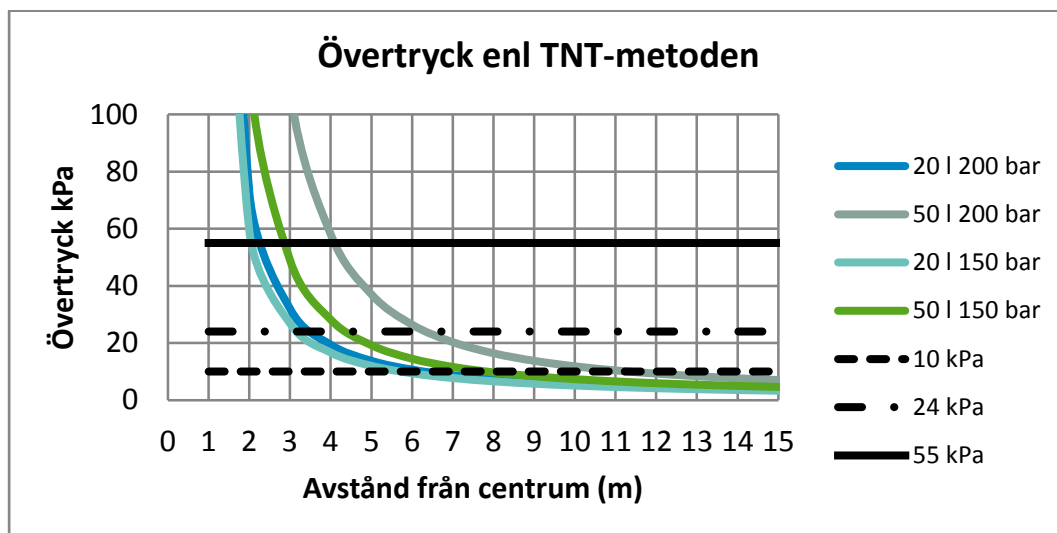
När kärlet brister expanderar gasen med en stötvåg som följd. Styrkan på stötvågen på olika avstånd, x , från centrum av explosionen kan man uppskatta med TNT-metoden. Efter att man räknat ut det skalade avståndet, $Z = x/M_{\text{TNT}}^{1/3}$ ges trycket i stötvågenⁱ:

$$P_s = \frac{80,800 \left(1 + \left[\frac{Z}{4.5} \right]^2 \right)}{\sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.048} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.32} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{1.35} \right]^2}}.$$

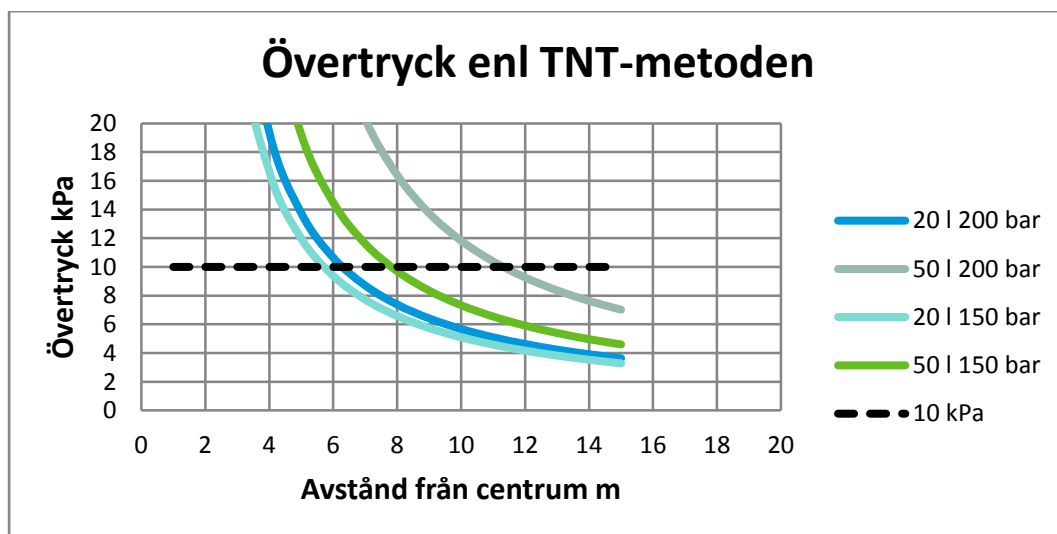
I figur 1-3 ges stötvågen på olika avstånd från explosionscentrum för 20 och 50 l gasflaskor med ett tryck av 150 och 200 bar för tre olika storlekar på tryckaxeln. Obs, beräkningarna har utförts med flaskor med storlek 20 och 50 l. Om flaskan har en volym av 400 l kommer Z att minska en faktor 2 och x öka en faktor 2 i figur 1-3.



Figur 1 Beräknad tryckverkan som funktion av avstånd.



Figur 2 Inzoomad del av figur 1.



Figur 3 Inzoomad del av figur 2.

För att beräkna övertrycket från en flaska med en volym på 200 liter skall avstånden i figurerna ovan multipliceras med tredjeroten av $200/50$ vilket är 1,59.

I tabell 3 i Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 1 [1] anges gränsvärden för människors känslighet mot olika trycknivåer.

Sammanfattning skada människa av 200 l behållare med 150 bars tryck (Figur 1-3):

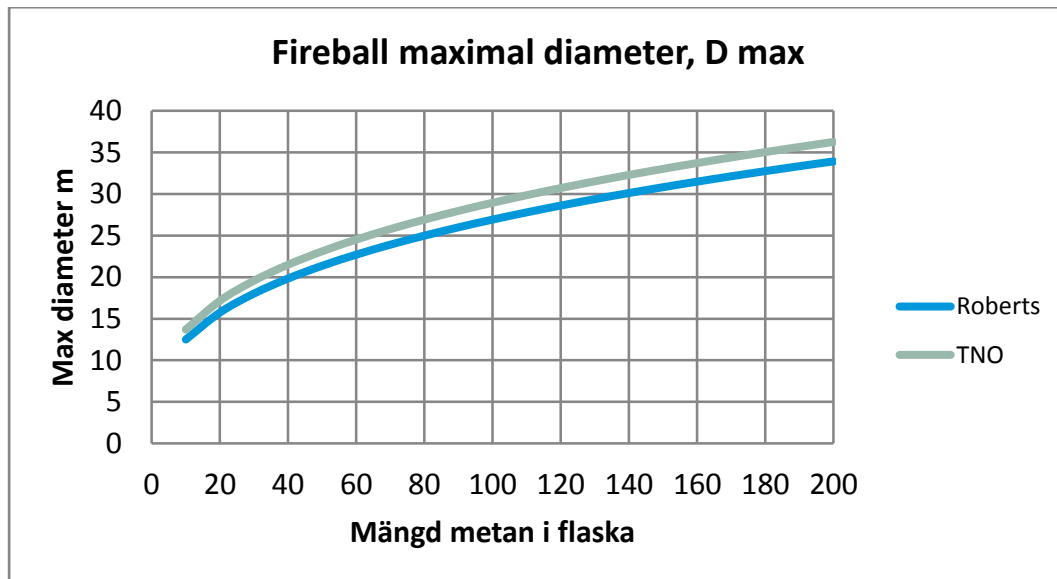
- Inom 3-4 meter från centrum av explosionen uppkommer mycket stora materiella skador. Takskyddet över flaskorna på bussarna kommer att kastas av. Risk för att andra gasflaskors ledningar skadas. Risk för att busstaket viker sig kan eventuellt föreligga med åtföljande gasutsläpp inne i bussen.
- Inom 5 m riskeras svåra eller dödliga skador på människor från explosionen.
- Över 12-13 meter bedöms människor endast påverkas av splitter.
- På avstånd över ca 12-13 m är tryckökningen mindre än 10 kPa.

Beräkningarna är gjorda under förutsättning att TNT-ekvivalentberäkningen fungerar för det aktuella fallet. Beräkningarna bedöms vara konservativa då bl.a. ingen hänsyn tas till den dämpande effekt på tryckvågen som takskyddet medför.

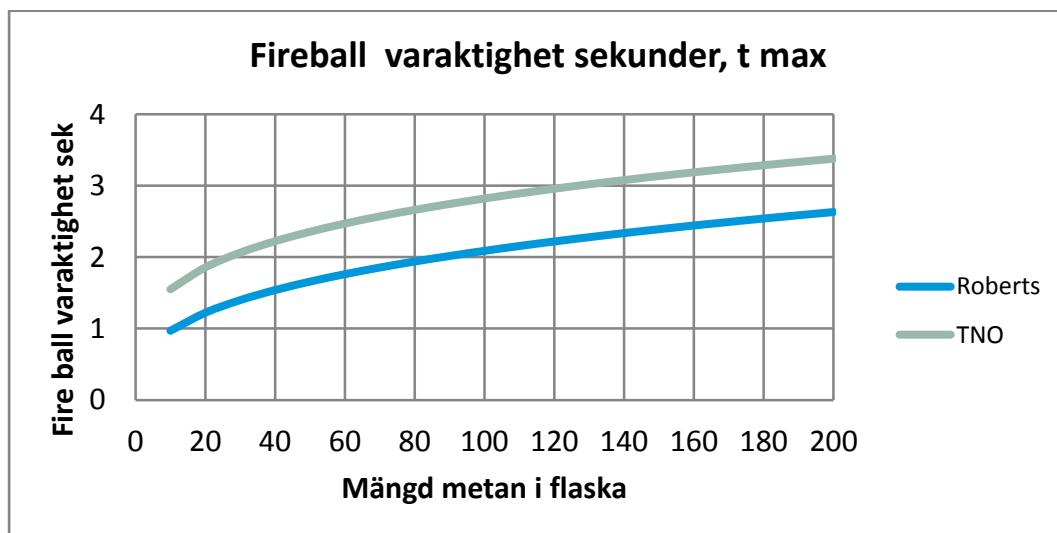
2 Beräkning av strålning från verkan av en fireball på människa och material

När ett kärl brister kan man uppskatta den maximala diameter och varaktighet på den s.k. fireball som bildas med empiriska uttryck. De empiriska uttrycken relaterar sig till experiment och erfarenheter utomhus.

Vid konsekvensberäkningarna nedan används två korrelerade empiriska metoder, av Robertsⁱⁱ och av TNOⁱⁱⁱ. Med hjälp av dessa formler kan man beräkna fireball's största diameter och varaktighet. I figur 4 redovisas metodernas bedömning av den maximala diametern och i figur 5 varaktigheten.



Figur 4 Maximal diameter som funktion av mängden gas i flaskorna.



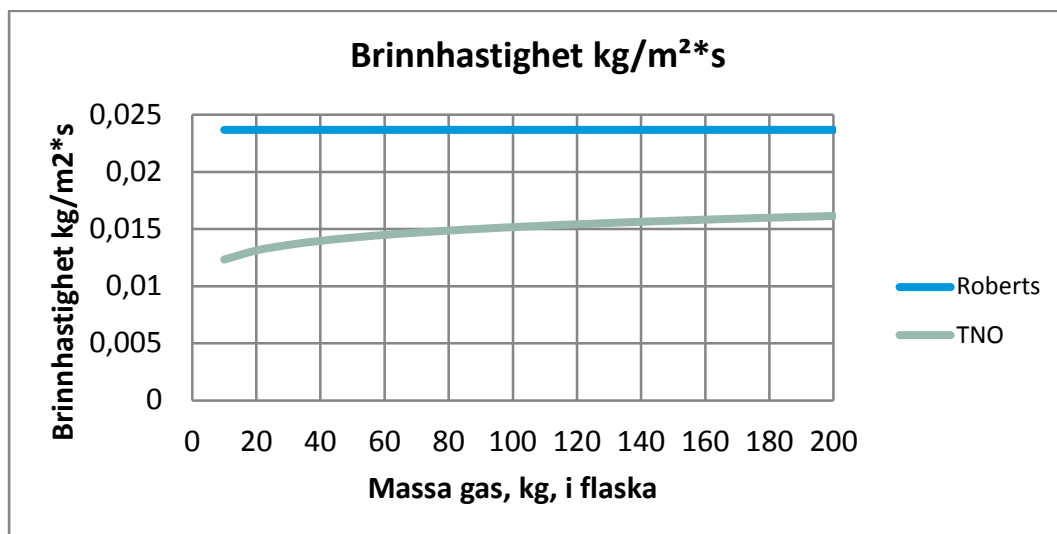
Figur 5 Varaktighet som funktion av mängden gas i flaskorna.

Som framgår av figur 4 ger de båda korrelationerna likartade diametrar. Varaktigheten av fireball varierar för korrelationerna mellan 1-3.5 sekunder.

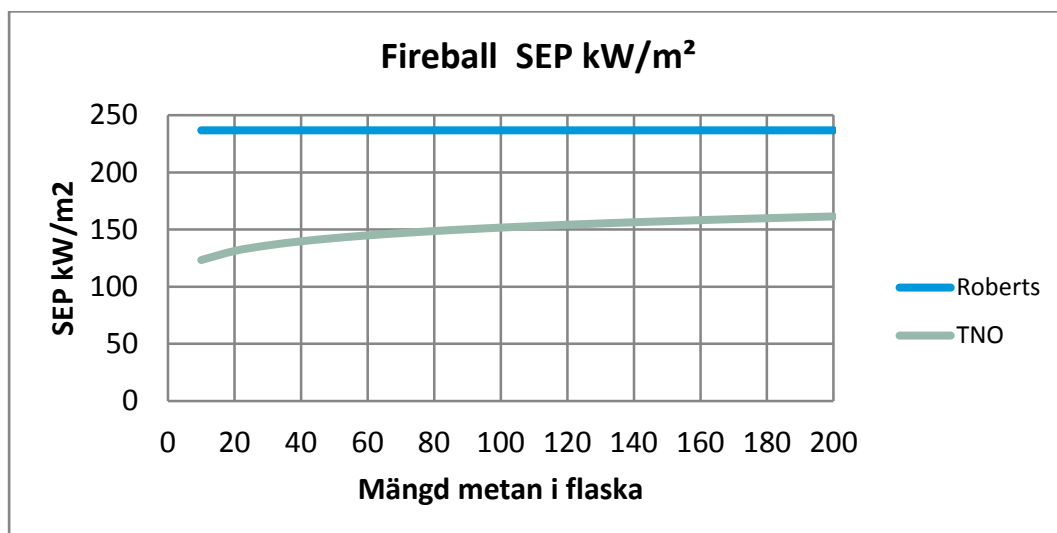
Man kan även beräkna brinnhastigheten som funktion av massan genom uttrycket:

Brinnhastigheten ($\text{kg/m}^2\text{s}$) = $\text{Massa gas i flaskan}(\text{kg}) / (0.888 * 3.14 * D_{\text{max}}^2 * t_{\text{max}})$.

I figur 6 visas brinnhastigheten och i figur 7 maximal Surface Emitting Power (SEP) som funktion av massa gas i flaskorna. $SEP = \text{Brinnhastigheten} \cdot \Delta H_C$ där luftens transmission satts =1.

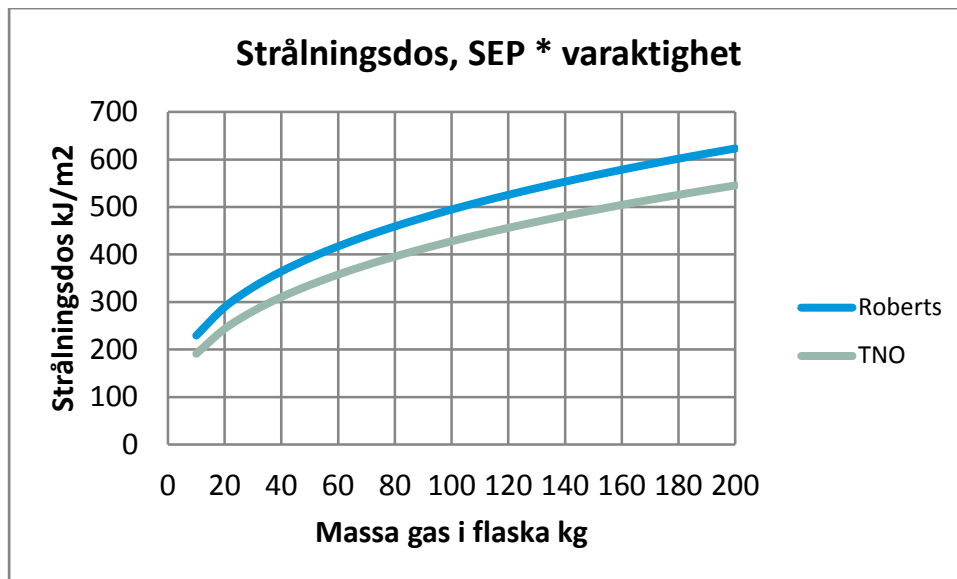


Figur 6 Brinnhastigheten i Fireball som funktion av mängden gas i flaskorna.



Figur 7 Ytemmissiviteten, SEP, som funktion av mängden gas i flaskorna.

Med hjälp av SEP, synfaktorer och varaktigheten av Fireball kan man uppskatta den strålningsdos som föremål på olika avstånd från Fireball utsätts för. Med hjälp av strålningsdosen kan man sen göra en bedömning av hur människa och material påverkas. I figur 8 visas strålningsdosen beräknad med utgående från Roberts och TNO data i figur 3-7 med synfaktorn = 1.



Figur 8 Strålningsdos för synfaktorn=1 som funktion av mängden gas i flaskorna.

Vid beräkningarna nedan av strålningsnivån på olika avstånd från Fireball's centrum används data beräknade med TNO:s metod. Roberts metod som presenterades 23 år före TNO (2005) ger ett konstant SEP oberoende av Fireball's diameter och kortare varaktighet. Strålningsdosen för metoderna ger, som visas i figur 8, en bättre överensstämmelse än SEP-värdena i figur 7.

När man skall bedöma synfaktorn på olika avstånd från Fireball centrum måste man ta hänsyn till att förbränningen sker inomhus och inte för de utomhusförhållanden som korrelationerna avser. Utomhus uppskattas att Fireball centrum befinner sig på höjden D_{max} meter över golv. I busstunneln sker kärlsprängningen på 2,5-3 m höjd vilket medför att fri höjd till taket endast är 7,5-8 m. Fireball kan därför inte utvecklas i höjdlid som utomhus utan måste utbreda sig mer i sidlängd där dimensionen är c:a 20 m i längdled. För att i viss mån kompensera för denna deformation av Fireball antas vid beräkningarna nedan att centrum av en sfärisk Fireball befinner sig på 5 m höjd över golv och utsträcker sig även en del under golv och över tak. Med dessa begränsningar i ges synfaktorn i golvnivå på olika avstånd av Fireball av:

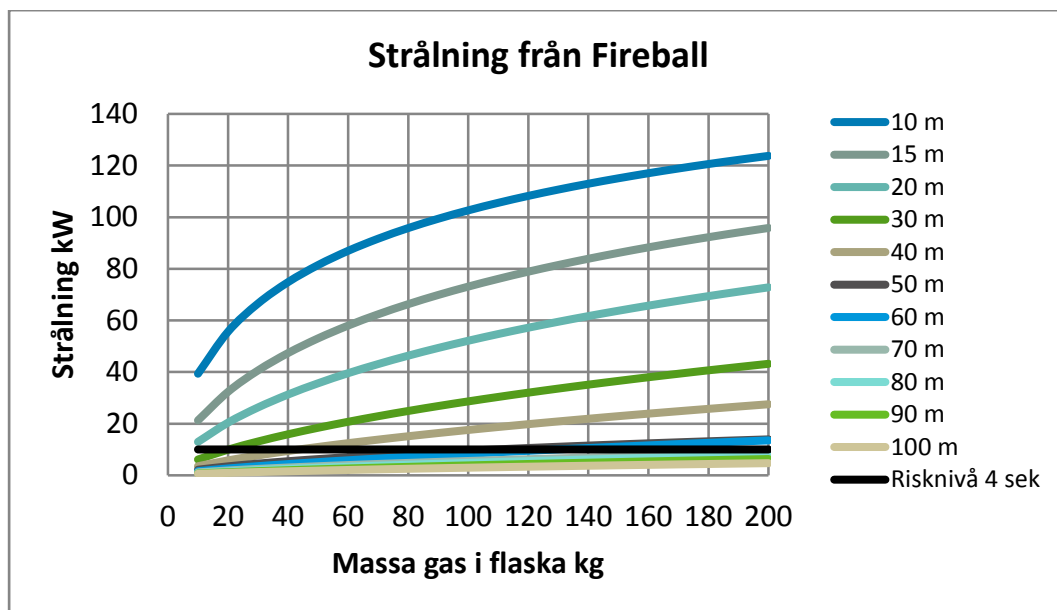
Synfaktorn = $(D_{max}/(\text{Rot}(5*5 + a*a)))^2$ där a =avståndet horisontellt från Fireball's centrum.

I figur 9 och 10 visas Strålningsnivån på olika horisontella avstånd från Fireball's centrum för data beräknade med TNO-metoden.

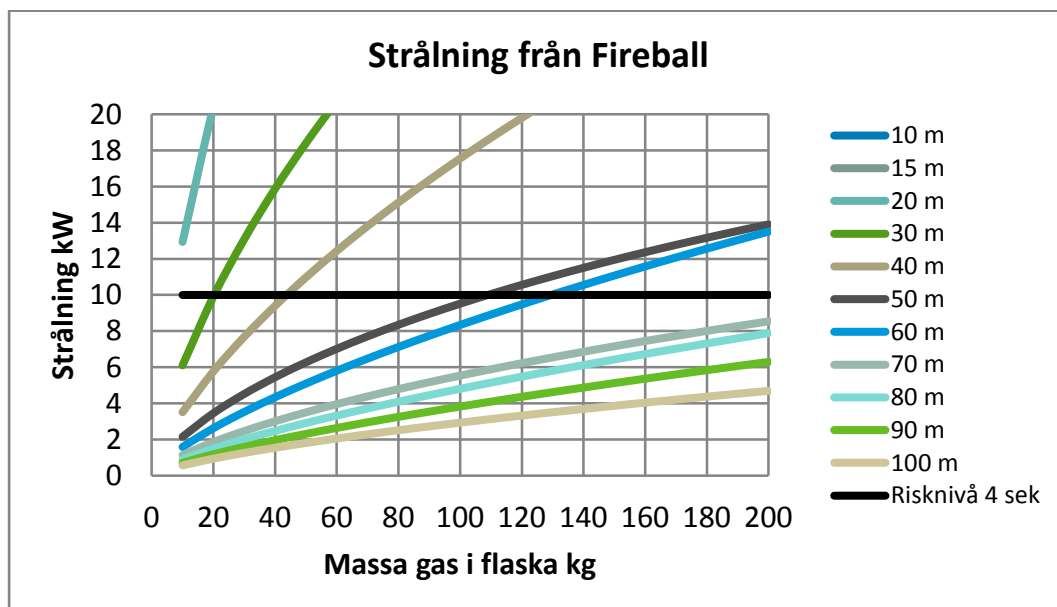
En konsekvens av den förenklade geometrin är att strålningen i närfältet av Fireball kommer att underskattas (mer gas förbränns under taket och längre ut vilket ger större synfaktor i närfältet) och överskattas på längre avstånd (synfaktorn minskar mer än för en sfär).

Då varaktigheten för en Fireball är mycket kortare än normala bränder måste man ta hänsyn till både strålningsnivån och varaktigheten när man bedömer risken för skada på människa och material.

För oskyddad hud finns en uppgift^{iv} om att man får brännskador efter 4 sekunder vid en strålningsbelastning av 10 kW/m^2 . Denna nivå inlagd i Figur 9 och 10 benämns Risknivå 4 sek.



Figur 9 Strålningsnivå på olika avstånd från fireball som funktion av mängden gas i flaskorna.



Figur 10 Inzoomad del av figur 9.

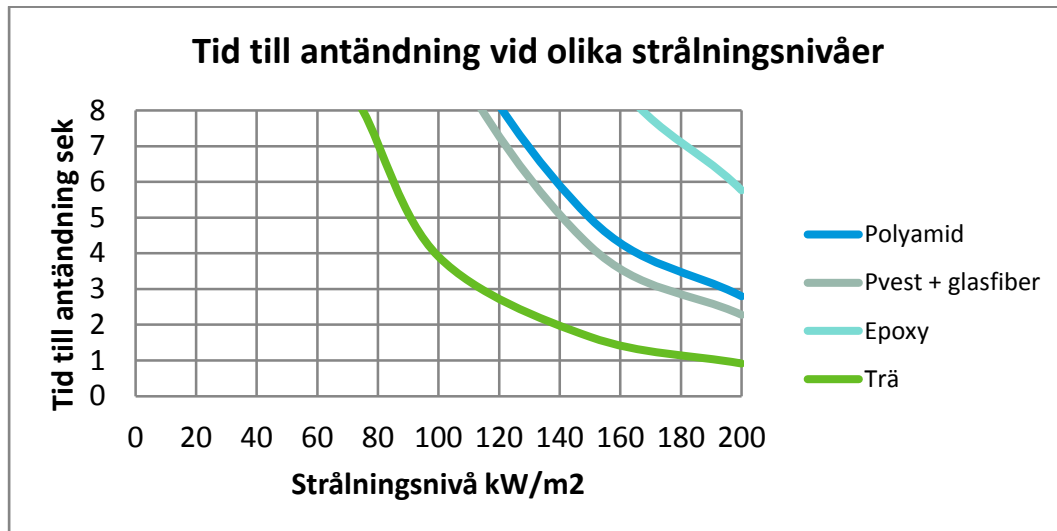
Tabell 2 Riskavstånd för oskyddad huv (2:a gradens brännskador) som funktion av mängden gas i flaskorna.

Kg gas i flaska	10	20	40	60	80	100	120	150	175	200
Riskavst (m)	20-30	30-40	40	40-45	45-50	50-55	55-60	<70	<70	<70

I tabell 2 har en säkerhetsfaktor 2 satts på avstånden för 10 och 20 kg utsläpp på grund av underskattning av synfaktorn nära Fireball som diskuterats ovan.

2.1 Riskavstånd för att antändbara gaser bildas strålningen för Fi-reball

För fasta material finns^{v, iv} uppgift om hur lång tid det tar för ett material att avge brännbara gaser (piloted ignition) vid olika strålningsnivåer upp till 75 kW/m^2 . Omfattande experiment har visat att om man plottar $1/\text{ROT}$ (antändningstiden) mot strålningsnivån får man en rak linje. Man kan sedan med linjens ekvation uppskatta antändningstiden för högre strålningsnivåer där allmänt tillgängliga publicerade experimentella data nästan helt saknas. Med denna metod har antändningstiden för några olika plastmaterial och trä uppskattats och redovisas i figur 11 för korta tider till antändning.



Figur 11 Riskavstånd för piloted ignition.

Av figur 11 framgår att vid 4 sekunders exponering är risken för att antändbara gaser bildas om strålningsnivån är högre än c:a 100 kW/m^2 . Enligt figur 9 motsvarar det ett riskavstånd mellan 10-15 m och ett utsläpp av minst 80 kg gas. För att ta hänsyn till den osäkra vilket där resulterar i en högre strålningsbelastning i närområdet bör man ta till en säkerhetsfaktor, förslagsvis en faktor 2 dvs. 20-30 m och ett utsläpp av minst 40 kg.

3 Referenser

ⁱ Fires, explosions, and toxic gas dispersion (Effects calculation and risk analysis) av Marc J. Assael and Konstantinos E. Kakosimos, CRE Press 2010.

ⁱⁱ Roberts A.F.. 1982. "*The Effect of Conditions Prior to Loss of Containment on Fireball Behaviour*". IChemE Symp.Series 71:397-429

ⁱⁱⁱ TNO.2005. "*Methods for the Calculation of Physical Effects due to Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases)*". Van den Bosch C.J.H. Wetereings R.A.P.M. (Eds.). Yellow book. Report CPR 14E. 3rd ED., ED., 2nd Rev.

^{iv} SFPE Handbook 3rd edition, Page 3-86 Figure 3-4.6

^v Fire and Materials 2007; 31:327-254



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Bilaga 4 – Osäkerhetsanalys beräkningar av tryckverkan

Stockholm

2016-09-20

Innehåll

1	Osäkerhetsanalys beräkningar av tryckverkan.....	3
1.1	Analysmetoder	3
1.2	Osäkerheter i "Grovanalys av konsekvenser från läckade av natur- eller biogas från bussar" av Göran Holmstedt	3
1.3	Osäkerheter i "Flacs CFD Simulation of leak and explosion scenarios in a bus terminal" Report No GexCon-13- F40876-RA-1, Bergen 21.02.2013 (Riskanalys avseende bussar med fordonsgas – Bilaga 5).....	4
2	Referenser	7

Ref. Nr	Namn	Titel	Version/Datum
1	X4-RA-800- 0101_bilaga 5	Riskanalys avseende bussar med fordonsgas – Bilaga 5	-

1 Osäkerhetsanalys beräkningar av tryckverkan

1.1 Analysmetoder

I riskanalysen har beräkningar genomförts med två olika metoder.

- ”Grovanalys av konsekvenserna från läckage av natur- eller biogas från bussar”, bilaga 4 ”Fördelning av naturgaskoncentration i övre delen av rummet” och bilaga 5 ”Bedömning av tryckverkan vid fördröjd antändning” av Göran Holmstedt.
- “FLACS CFD Simulation of leak and explosion scenarios in a bus terminal” Report No Gex-Con-13-F40876-RA-1, Bergen 21.02.2013 (Riskanalys avseende bussar med fordonsgas - Bilaga 5).

Osäkerheten i tryckvågens styrka och rumsliga utbredning är beroende av både dispersions- och explosionsberäkningarna.

Avsikten med dispersionsberäkningarna har varit att bedöma hur stor mängd naturgas (metan) som maximalt kan ansamlas i gasvolymen över utsläppspunkten. Om denna ansamlade mängd antänds (fördröjd antändning), kan en efterföljande gasexplosion alstra en tryckvåg som kan påverka konstruktioner och människor nära utsläppspunkten. Hur mycket gas som ansamlats med en koncentration mellan brännbarhetsgränserna är avgörande för tryckvågens styrka.

1.2 Osäkerheter i ”Grovanalys av konsekvenser från läckade av natur- eller biogas från bussar” av Göran Holmstedt

1.2.1 Bilaga 4. ”Fördelning av naturgaskoncentrationen i övre delen av rummet”.

Den förenklade metoden fördelar hela utsläppet momentant i hela den övre volymen av rummet dvs. som en ”well stirred reaktor”. Metoden tar hänsyn till ventilationen. Förenklningarna medför att den ansamlade gasmängden i volymen över utsläppet överskattas då:

- Hänsyn tas inte till att gas nära utsläppet har en gaskoncentration som är långt över den övre brännbarhetsgränsen. Antagandet medför en överskattning av volymen gas med metaninnehåll mellan brännbarhetsgränserna. Överskattningen kan enligt GexCon’s simulering uppskattas till mindre än 0,5 m³ eller mindre än 0,35 kg.
- Luftinblandning från den nedre delen av rummet försummas. Antagandet medför en överskattning volymen gas med metaninnehåll mellan brännbarhetsgränserna. Enligt GexCon’s simuleringar sugr luften upp vertikalt längs bussens sidor med en hastighet av c:a 2m/s över en rätt stor horisontell yta på flera m². Den totala luftinblandningen från den nedre delen av rummet som försummats i ”well stirred” reaktorkonceptet kan ha orsakat en överskattning av medelgaskoncentrationen. Man kan få en uppfattning av överskattningen genom att öka ventilationen till 10-20 m³/s. Vid denna ökning av ventilationen kommer den mängd metan som ansamlas i volymen att minska en faktor 5-7.
- Man tar ingen hänsyn till att takstrålen kan transportera gas utanför den stipulerade volymen vilket har samma inverkan på modellen som om man ökar ventilationen. Antagandet medför en överskattning volymen gas med metaninnehåll mellan brännbarhetsgränserna.
- Relationen mellan medelkoncentrationen och hur stor mängd som finns inom brännbarhetsområdet är okänt.

Sammanfattning av grovanalysen:

- Uppskattningarna med den använda well stirred metoden ger endast storleksordningen på medelkoncentrationen i en fix volym i den övre halvan av tunneln där gaserna antas recirkulera och jämna ut koncentrationen. Volymen har varierats mellan 500-4000 m³.
- Well stirred metoden bedöms överskatta den ackumulerade massan metan med en faktor 10 under förutsättning att Flacs simulering av hastighetsfältet stämmer. FLACS simulering ger en stor luftinblandning från den nedre delen av tunneln till den övre på grund av undertrycket som skapas av jeten.
- Denna luftinblandning medför att well stirred metoden ger en ackumulerade massan metan i den övre volymen (1000 m³) av 1 respektive 2 kg för en inblandning av 20 respektive 10 m³/s från den nedre volymen.
- I den övre volymen blir medelkoncentrationen med well stirred metoden efter 10 minuter mindre än den undre brännbarhetsgränsen. Detta medför att endast en del av denna massa, 1-2 kg, kan ha en koncentration som ligger mellan brännbarhetsgränserna.

1.2.2 Bilaga 5. "Bedömning av tryckverkan vid fördröjd antändning"

Vid beräkningarna användes "multi-energy method" (van den Berg 1985). Som påpekats är osäkerheten i det beräknade övertrycket med metoden relativt stor. Metoden tar inte hänsyn till att gasvolymen är innesluten i en tunnel utan relaterar sig till förhållande utomhus. Beräkningarna med metoden ger för 10 kg metan stökiometriskt blandad med luft ett övertryck på 10 kPa på 7 m avstånd från utsläppspunkten.

1.3 Osäkerheter i "Flacs CFD Simulation of leak and explosion scenarios in a bus terminal" Report No GexCon-13-F40876-RA-1, Bergen 21.02.2013 (Riskanalys avseende bussar med fordonsgas – Bilaga 5).

Inom säkerhetsanalys är intresset mer fokuserat på gasdispersion i fjärrfältet än på detaljer av flödesstrukturen nära utsläppspunkten där det sker stora ändringar i flera flödesvariabler. Av detta skäl används förenklade semiempiriska modeller för att beräkna tillstånden i jeten (medelhastighet, koncentration mm.) i en tvärsektion där jeten har nått atmosfäriskt tryck. Dessa tillstånd i tvärsektionen används sedan som randvillkor för inflödet i simuleringar där fluiden kan betraktas som inkompressibel. Sådana simuleringar är beräkningsmässigt mycket mindre krävande än de som beaktar kompressibla fluider. FLACS använder sig av en förenklade semiempirisk formel för närfältet och utför spridningsberäkningarna i fjärrfältet med en inkompressibel RANS-kod. Koderna har en standard $k-\varepsilon$ turbulensmodell och har ett kartesiskt koordinatsystem.

1.3.1 Kommentarer till osäkerheten i spridningsberäkningarna i FLACS:

- Koderna använder sig av ett kartesiskt koordinatsystem dvs. den cirkulära jetstrålen representeras av en fyrkantig stråle. Osäkerheten är svår att uppskatta men den bör minska med ökad nodtäthet.
- Gridtätheten är extremt liten, 0,4 m upplösning i den stora beräkningen i tunnelscenariet. Osäkerheten är störst i jetstrålen upp till taket. Bedömningen att osäkerheten i metaninnehållet mellan brännbarhetsgränserna kan ha underskattatsⁱ med minst en faktor 2.
- Hela inflödet simuleras av en cell yta, 0,4*0,4 m². Man kan ifrågasätta hur gridberoende simuleringarna är. Det finns i litteraturen information om gridberoende jetsimuleringar. Den si-

mulering av en fri jet som senare utförts med 0,5 dm upplösning för att visa på gridberoende är inte direkt kopplad till det scenario där jeten träffar ett tak.

- Ett empiriskt värde måste anges på den turbulent kinetiska energin för inflödet. Enligt GexCon har detta ansatts till 10 %. Den turbulenta kinetiska energin som valts vid inloppet kan anges som en justerbar parameter för att anpassa simuleringar till experimentella försök (validering). I det aktuella fallet verkar det valda 10% ha en rimlig storleksordning.
- Olika koder, både kompressibla och icke kompressiva ger olika bedömning av fjärrfältet för samma scenario^{ii,iii}. Diskrepansen mellan modellerna varierar med avståndet från utsläppspunkten. Avvikelser i uppmätt koncentration är i storleksordning 20-30 %. Dock saknas ofta experimentella mätningar varför avvikelserna mellan simulering och experiment kan vara större.
- Simuleringarna visar att det inte blir någon ansamling av brännbara gaser med tiden dvs. det sker mycket lite recirkulation av gaser som nått taket tillbaka till jeten. Detta är den största orsaken till skillnaden mellan CFD-modellen och grovanalysen. Det är i det aktuella scenariot osäkert hur pass bra FLACS simulerar recirkulationen av expanderad gas tillbaka till jeten. Det krävs en jämförelse med experiment för att validera detta.

1.3.2 Kommentarer till tryckberäkningarna i FLACS

I FLACS används den ackumulerade gasmassan med en koncentration mellan explosionsgränserna som beräknats fram med spridningsprogrammet. Med utgångspunkt från massan räknas den sedan om till en sfärisk gasvolym med en stökiometrisk koncentration. Därefter läggs gasvolymens centrum på ett avstånd ovanför bussen och med en annan beräkningsmodul beräknas flamspridningen och tryckökningen. Objekt inom explosionsvolymen ökar turbulensen vilket i sin tur ökar flamaccelerationen. En enkel empirisk modell används för att beskriva hur turbulensen påverkar förbränningshastigheten.

Explosionsberäkningarna har utförts för en ackumulerad massa metan av 0,1 respektive 10 kg vilket motsvarar cirkulära stökiometrisk volymer med radierna ca 0,7 respektive 3,5 m. Dessa avstånd är relativt små varför 0,1 kg ackumulerad gasmassa inte ger någon nämnvärd tryckökning. För 10 kg ackumulerad massa blir tryckvågen maximalt 13 kPa dvs. marginellt högre än vad den grövre analysen gav (10 kPa). Samstämmigheten mellan modellerna verkar rimlig då den endast finns få turbulensalstrande föremål kring gasmolnet med 3,5 m radie. Resultatet blir i stort som om explosionen ägt rum utomhus dvs. under samma förhållanden som den semiempiriska formeln anpassats för.

1.3.3 Sammanfattning av simuleringarna med FLACS:

Spridningsberäkningar

- Osäkerheten i spridningsberäkningarna beror av flera faktorer:
 1. Griden, 0,4 m i det stora scenariot är för stor i förhållande till jetens dimensioner vilket medför att lösningen är gridberoende.
 2. Uppgift saknas om hur pass väl den semiempiriska modellen i närfältet och simuleringarna i fjärrfältet är validerade mot experiment som liknar det aktuella scenariot.
 3. FLACS använder sig av $k-\varepsilon$ turbulensmodell och sätter den turbulenta kinetiska energin till 10% vid inflödet.
 4. FLACS använder ett kartesiskt koordinatsystem vilket medför att bussarna har placerats tvärs tunnelns längdriktning.

- En uppskattning av osäkerheten mellan FLACS och en annan CDF PHOENICS finns beskrivenⁱⁱ. Diskrepansen i simuleringarna av koncentrationsfältet från en högtrycksjet är i storleksordning 20-30 %
- En uppskattning av hur valet av turbulensmodell påverkar koncentrationsfördelningen i en fri jet och hur pass väl olika modeller stämmer överens i närfältet finns beskrivetⁱⁱⁱ. Avvikelsen mellan $k-\varepsilon$ modellen och experiment är på vissa avstånd 50 %.

Tryckberäkningar

Osäkerheten i beräkningen av explosionstrycket beror på flera faktorer:

- Beräkningarna utförs för en sfärisk gasvolym med stökiometrisk koncentration och inte för simulerade volymen inom brännbarhetsgränserna.
- Den sfäriska gasvolymen läggs in i scenariet ovanför bussen och antänds i centrum. Ingen hänsyn tas till att gasjeten fortfarande kan pågå, man lägger in volymen i stillastående luft ovanför bussen.
- Uppskattning av osäkerheten kan endast göras av GexCon som har stor erfarenhet av validering mot andra scenarier.

1.3.4 Sammanfattning av bedömningen av tryckvågens utredning

Spridningssimuleringen

- Simulering av spridningsberäkningarna skiljer sig mycket mellan grovanalysen och CFD-simuleringarna. Huvudskälet tycks vara att CFD-beräkningarna visar att takstrålen som bildas när jeten träffar taket fortsätter längs taket och inte recirkulerar. Koncentrationen metan nära utsläppet kommer därför inte att öka. För grovanalysen betyder det att ventilationen kraftigt ökar vilket minskar den ackumulerade gasmassan med minst en faktor 10 dvs till en massa av ca 1 kg.
- Osäkerheten i FLACS simuleringarna är svåra att uppskatta. En högtrycksjet skiljer sig simuleringen av koncentrationsfältet 20-30 % mellan FLACS och en annan CDF kodⁱⁱ.
- I ref 1 visas att för en högtrycksjet skiljer sig simuleringen av koncentrationsfältet med CFD upp till 50% från experimentella data.

Tryckberäkningar

- Uppskattning av osäkerheten i FLACS kan endast göras av GexCon som har stor erfarenhet av validering mot andra scenarier.
- Enda sättet att få total visshet är att göra en experimentell studie i en tunnel med ett likartat utsläppsscenario.
- Den ackumulerade gasmassan bedöms, om FLACS simuleringarna av gasspridningen är rimliga, till mindre än 1 kg vilket resulterar i en tryckvåg på klart mindre än 10 kPa vid väggen till vänthallen.

2 Referenser

ⁱ “Numerical study for accidental gas releases from high pressure pipelines”, N. Novambre et al. European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006

ⁱⁱ “Numerical investigation of the flammable extent of semi-confined hydrogen and methane jets”, A.Hourri et al. International journal of hydrogen energy, 36 (2011) 2567-2572

ⁱⁱⁱ ”CFD study of gas dispersion and jet fires in complex geometries”, Ph.D. Thesis Jörgen Osenbroch Aalborg University 2006



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Bilaga 5 – CFD -beräkningar av GexCon

Stockholm

2016-09-20

BERGEN - 07.03.2013

Ref. No.: GexCon-13-F40876-RA-1

Rev.: 02

REPORT

FLACS CFD Simulations of leak and explosion scenarios in a bus terminal

Client
WSP

Author(s)
Arnt-Lennard Fuglestad



Document Info

Author(s)

Arnt-Lennard Fuglestad

Classification

Confidential (F)

Title

FLACS CFD Simulations of leak and explosion scenarios in a bus terminal

Extract

The release of a flammable fuel gas from a bus inside a bus terminal has been analysed. The parameters varied in the simulations were the flow rate of the ventilation system, and the leak diameter. The leak diameters studied in this report are 2 mm and 6 mm. None of the dispersion simulations carried out showed proof of significant flammable gas clouds.

Explosion simulations with two different gas clouds have been performed; 100 g and 10 kg of methane. No significant explosion overpressures were measured for the smaller gas cloud. For the larger gas cloud a maximum explosion overpressure of 0.13 bar(g) (13 kPa) was observed, with worst-case ignition.

Project Info

Client

WSP

Clients ref.

Anna-Maria Ejrup

GexCon Project No.

40876

GexCon Project Name

WSP-Process-Biogas_Bus-terminal_Dispersion-Explosion

Revision

Rev.	Date	Author	Checked by	Approved by	Reason for revision
00	21.02.2013	Arnt-Lennard Fuglestad	Nicolas Salaün	Nicolas Salaün	Draft report
01	28.02.2013	Arnt-Lennard Fuglestad	Nicolas Salaün	Nicolas Salaün	Added an appendix with further results from explosion simulations
02	07.03.2013	Arnt-Lennard Fuglestad	Nicolas Salaün	Nicolas Salaün	Report updated according to comments from the client (received 04.03.2012)

Disclaimer

GexCon shall not be liable for damages, which the assignor, or assignor's clients, vendors, consultants or other third party, suffers when applying or using the results of GexCon's work, unless there is misconduct or gross negligence on the part of GexCon or on the part of the persons used by GexCon to carry out the work.

Table of Contents

Disclaimer	3
1 Introduction	5
1.1 Main scope of work	5
1.2 Geometry model.....	5
1.3 Initial venting	6
1.4 Dispersion simulations	7
1.4.1.1 Introduction	7
1.4.1.2 Source terms	7
2 Dispersion simulations.....	9
2.1 Introduction	9
2.2 Leak diameter 2 mm	9
2.3 Leak diameter 6 mm	11
3 Explosion simulation	14
3.1 Explosion scenario definitions.....	14
3.2 Monitoring the explosion simulations	15
3.3 Results of explosion simulations.....	18
3.3.1 Introduction	18
3.3.2 Flame propagation.....	18
3.3.3 Overpressure loads	20
4 Conclusion.....	24
4.1 Dispersion simulations	24
4.2 Explosion simulations.....	25
Appendix A : Extended explosion results	26
Appendix B Brief technical description of the FLACS CFD solver and FLACS solver validation	34
Appendix C Uncertainties and coarse sensitivity assessment	35
C 1 FLACS uncertainties	35
C 2 Coarse sensitivity assessment on results	35
C 2.1 Dispersion.....	35
C 2.2 Explosion	39
Appendix D Source terms.....	40
D 1 Transient source term for the 2 mm leak	40
D 2 Transient source term for the 6 mm leak	42

1 Introduction

1.1 Main scope of work

The purpose of this study is to analyse release, dispersion, delayed ignition and explosion loads inside a bus terminal as a consequence of a leakage of fuel gas from a bus. All necessary simulations of release, dispersion and explosion have been carried out using the commercially available CFD software FLACS developed, maintained and upgraded in-house by GexCon Norway.

The fuel gas consists of a mixture between 97 % methane and 3 % CO₂.

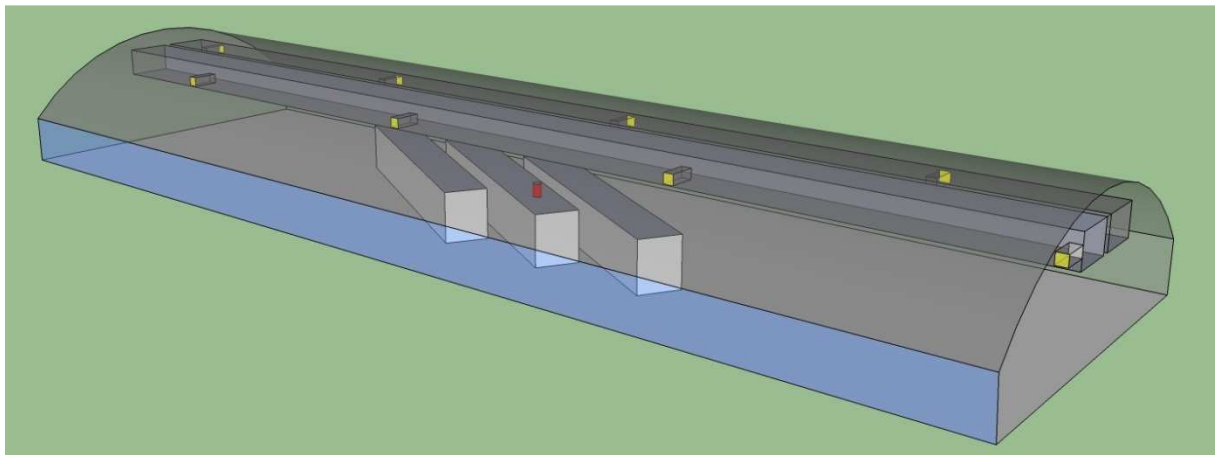


Figure 1.1 Basic outline of the geometry of the bus terminal, buses represented by boxes, leak represented by red cylinder

The simulations are carried out for a simplified geometry, approximately 70 m long, 20 m wide and 8 m to the ceiling. If fuel gas leaks from one of the buses, a combustible cloud might build up inside the terminal. If ignited the subsequent explosion might cause harm to the surroundings. In Figure 1.1 above is shown a light blue wall. On the other side of this wall there's a waiting hall. The monitoring of explosion loads on this wall has been of particular interest. An exhaust ventilation system is mounted in the ceiling of the bus terminal. The effects of the ventilation system have been taken into account in the simulations. The performance of the ventilation in terms of flow rate and flow speed is provided by the client.

According to the request made by WSP, two main leak scenarios have been assessed during this study. These are leak diameters of the order of magnitude of 6 mm and 2 mm. These leaks model a hole in the tubing from the fuel tanks of the bus. Locations of these leaks are informatively illustrated in red on Figure 1.1 and in green in Figure 1.2. In both cases the release is directed upwards, and the initial storage pressure is 150 bar. The storage pressure will decrease as the leak progresses, as will the leak rate.

1.2 Geometry model

A geometry model based on the main dimensions of the bus terminal (and the buses) provided by the client has been made. Because of the way FLACS is built up (with Cartesian control volumes for the computational domain and object representation), the buses were located orthogonally to the length axis of the terminal. The grid was homogenous, with a resolution of 25 cm.

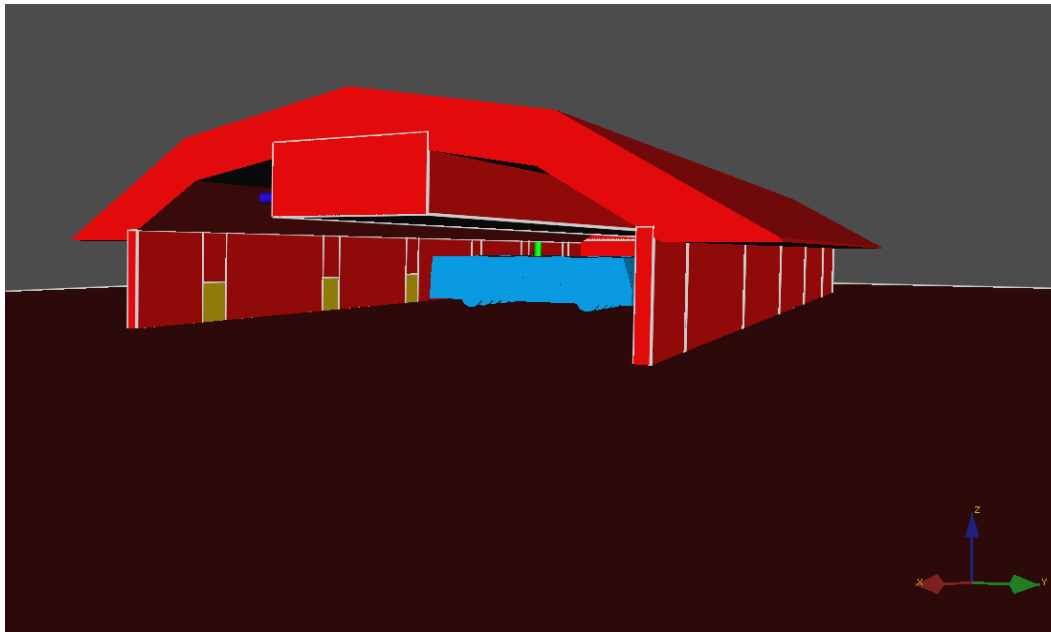


Figure 1.2 FLACS geometry model of the bus terminal

1.3 Initial venting

The ventilation system inside the bus terminal consists of six air inlets and five air outlets along the floor. In addition there are eight air outlets underneath the ceiling. The dispersion simulations have been performed with two different flow rates for the ventilation. The specifications for the two flow rates are stated in Table 1.1 and Table 1.2 below and have been provided by WSP. To ensure that the flow from the ventilation system is fully developed and reaches steady state condition, 50 s was simulated before the leak was initiated.

Table 1.1 Low ventilation rate

	No.	Flow rate per inlet/outlet [m ³ /s]
Inlet	6	0.45
Outlet - floor	5	0.15
Outlet - ceiling	8	0.20

Table 1.2 Medium ventilation rate

	No.	Flow rate per inlet/outlet [m ³ /s]
Inlet	6	0.98
Outlet - floor	5	0.32
Outlet - ceiling	8	0.44

1.4 Dispersion simulations

1.4.1.1 Introduction

Dispersion simulations have been run to establish the potential gas cloud build-up inside the bus terminal.

The leak scenarios that have been analysed in the dispersion are leaks from a hole in the tubing to the fuel gas tank of the bus. The diameter of the leak should be taken to be:

- 6 mm directed upwards
- 2 mm directed upwards

The main purpose has been for each case to determine if a significant flammable gas cloud is generated inside the terminal area.

1.4.1.2 Source terms

The released gas consists of 97 % methane and 3 % CO₂.

LFL (Low Flammable Limit) corresponds to a gas concentration of 5.5 vol %, whereas UFL (Upper Flammable Limit) corresponds to 14.7 vol % in air.

The leak point is located at 4.25 m above the ground level. In FLACS the source term is modeled after expansion to atmospheric pressure. The expansion is modeled according to the Rankine-Hugoniot conservation equations for 1 dimension normal shocked flow. No initial air is entrained during this phase; this is usually considered as a conservative assumption compared to reality.

The 6 mm source term is modeled after expansion to atmospheric conditions as a jet with a cross sectional area of 0.0045 m² (corresponds to a diameter of approximately 7.6 cm).

For the 2 mm source term the corresponding figure is 0.0005 m² (2.5 cm).

For both of the leak diameters the initial expanded gas velocity after normal shock is approximately 235 m/s.

The leak source term is transient, taking into account the decreasing leak rate as the storage pressure of the fuel tank decreases from the initial value of 150 bar(g).

The temperature drop of the gas as the pressure drops from 150 bar(g) to atmospheric has also been taken into account. It is expected that this will have a slight effect on the density of the gas, in the sense that the gas could behave as a passive plume rather than light gas.

Regarding the two leak diameter assumptions, it is very likely to observe the maximal gas cloud size in an early stage of the development of the flammable plume. The dispersion as jet will determine the extent of the gas cloud with concentration of LFL and above. The maximal extent will then be encountered at the time when the flow rate is the largest for these small leak sizes (see provided details in 2.2 and 2.3).

Note that this is related to the small leak size assumptions; given the confined geometry, the gas buoyancy and the mechanical ventilation flow fields, this would not be the case if the plume reaches a passive dispersion phase at concentration higher than LFL.

For the case with 2 mm leak diameter the initial value of the leak rate was 82 g/s, dropping to 80 g/s 60 seconds after the release was initiated (for example).

For the case with 6 mm leak diameter the initial value of the leak rate was 741 g/s, dropping to 570 g/s 60 seconds after the release was initiated (for example).

These two source terms, used as input for the FLACS dispersion simulations are provided in details in Appendix D. Note that these values are in line with similar estimations found for example in ATEX normative document (IP 15 code, see Appendix C).

2 Dispersion simulations

2.1 Introduction

Three simulations have been performed, varying both the leak diameter and the ventilation flow rate. Outputs from the dispersion simulations are flammable mass contained in heterogeneous clouds. The flammable mass contained in each of the cells in a flammable state is extracted and summed up among the whole domain. The mixture is considered as flammable when the gas fraction is between LFL and UFL.

Traditionally, these mass and volume of flammable mixture are transformed into idealized homogeneous stoichiometric gas cloud to assume optimal reactivity and conservatism.

2.2 Leak diameter 2 mm

In the case of the leak diameter of 2 mm, only one simulation with the medium ventilation rate has been performed. In Figure 2.1 are shown three different sections that visualize the gas cloud resulting from a leak with a diameter of 2 mm. Gas cloud concentrations between the lower flammable limit (LFL) and the upper flammable limit (UFL) are visualized. This simulation showed no measureable amounts of gas of flammable concentration. Furthermore the small extent of the cloud keeps on decreasing with time.

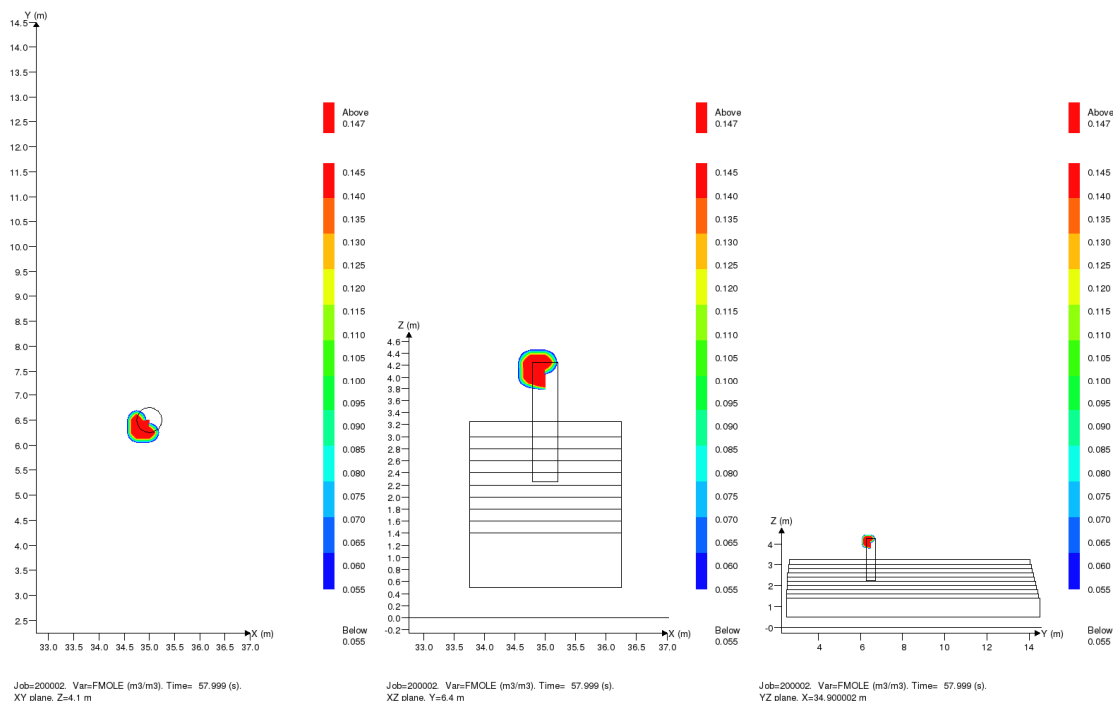


Figure 2.1 2 mm leak diameter – medium ventilation rate (horizontal plane at leak elevation to the left, vertical cut plane along the analysed section of the terminal (middle) and across the analysed section of the terminal (right))

Given this estimation, it is assumed that the geometry has no significant impact on the dispersion. A simpler model (PHAST tool, validated for dispersion over flat terrain without obstacle) has thus been used to confirm this estimation using a 3 m/s wind assumption. The maximum release rate has been found to be 90 g/s with a flammable extent of 1 m and no significant amount of flammable mass accumulated.

Note also that this is in good agreement with the values extracted from the ATEX normative document IP15, see in Appendix C.

2.3 Leak diameter 6 mm

In the case of the leak diameter of 6 mm, two dispersion simulations have been performed, one for each of the two ventilation flow rates (the leaks started after 50 s of simulation aiming at establishing a steady state ventilation flow field).

For both of the simulations it is observed that (see Figure 2.2):

- During the first 5 s of the releases the jet interacts with the prevailing air flow in the tunnel (this is also due to the fact that the release is smoothed in the first time step to allow calculation stability),
- The maximal extent of the flammable gas cloud and the maximal flammable mass occur after approximately 6 – 8 s after the start of the release,
- The maximal extent of the flammable gas cloud and the maximal flammable mass continuously decrease according to decreasing leak rates afterwards.

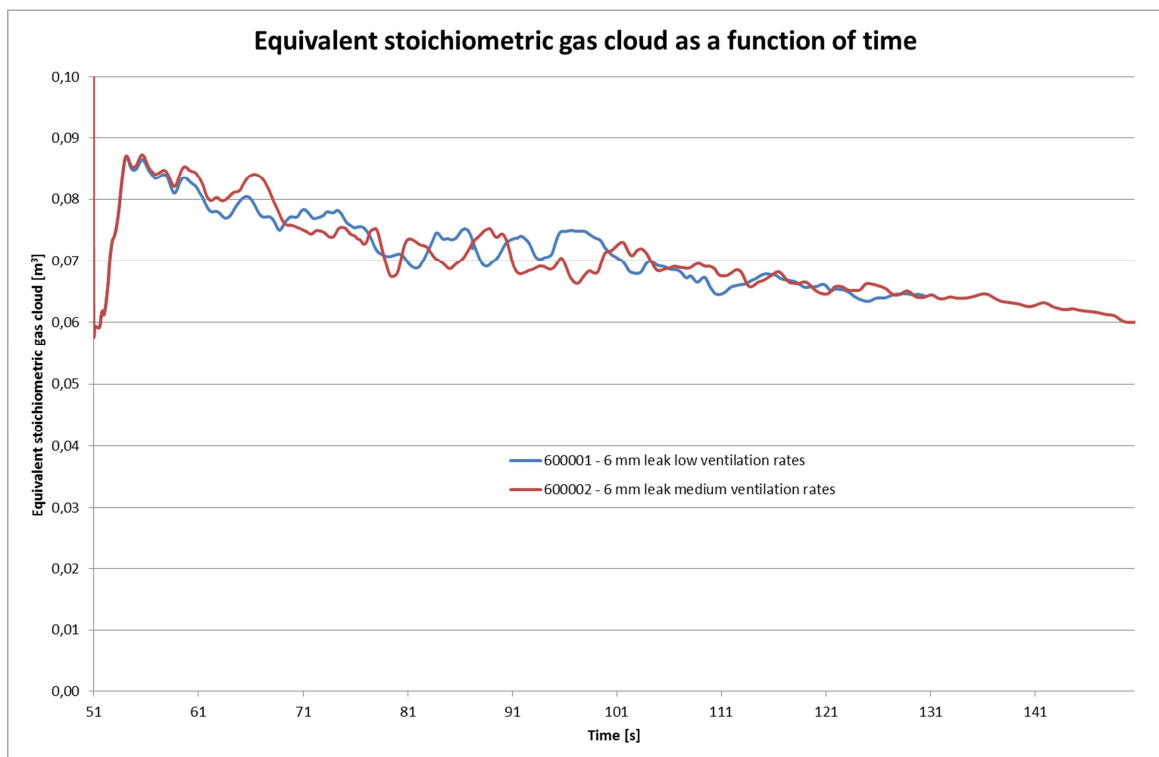


Figure 2.2 Transient monitoring of the equivalent stoichiometric gas cloud size for both the 6 mm leaks

In Figure 2.3 and Figure 2.4 are shown three different sections that visualize the maximum extent of the gas cloud resulting from a leak with a diameter of 6 mm, with low and medium ventilation rates respectively. Gas cloud concentrations between the LFL and UFL are visualized.

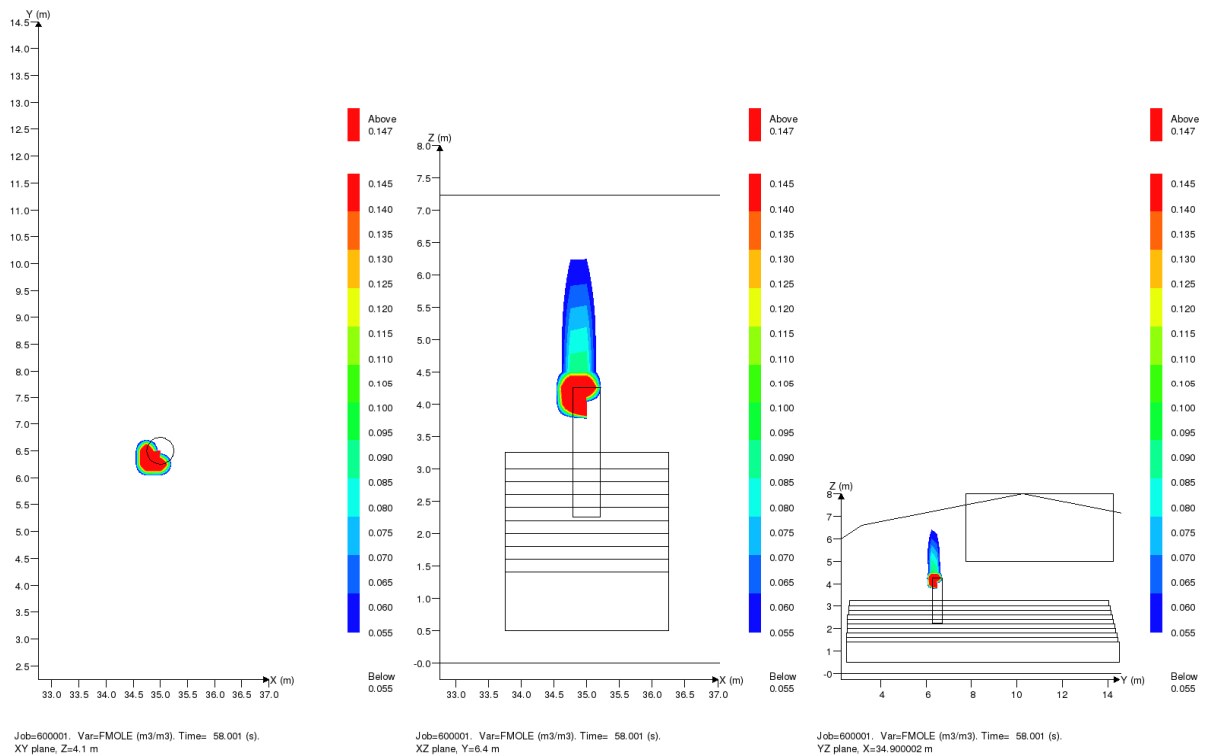


Figure 2.3 6 mm leak diameter – low ventilation rate (horizontal plane at leak elevation to the left, vertical cut plane along the analysed section of the terminal (middle) and across the analysed section of the terminal (right))

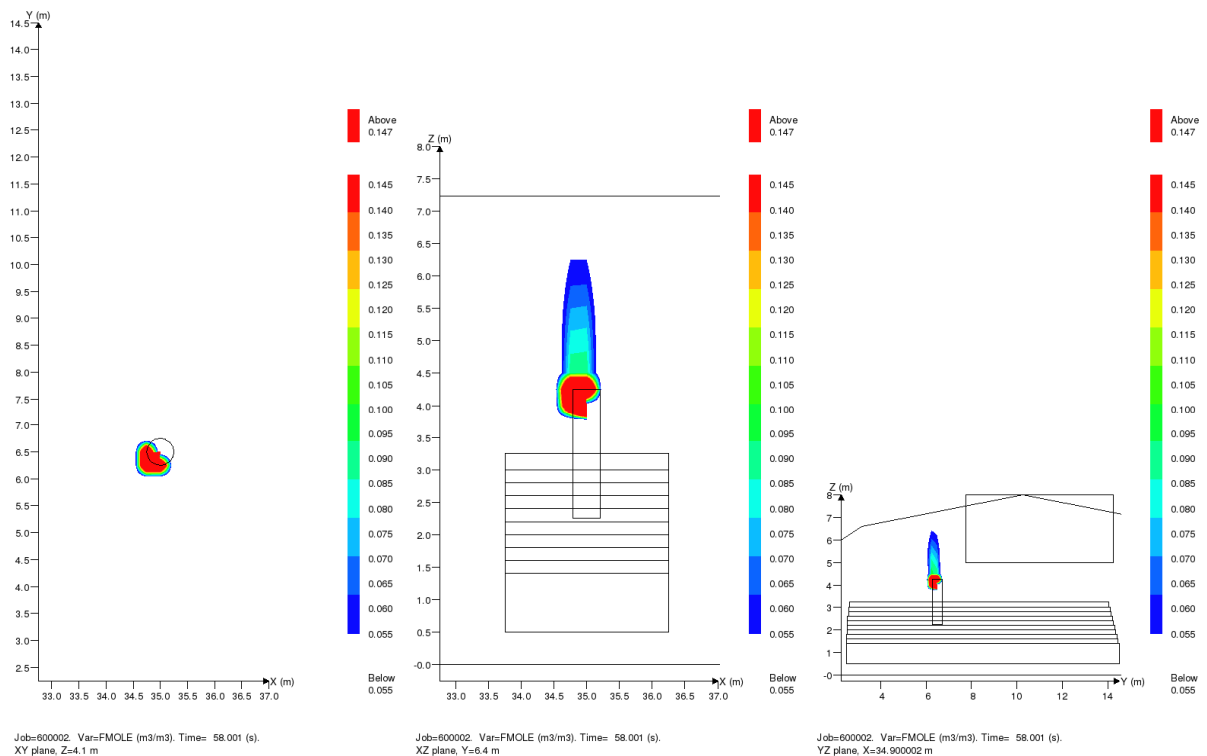


Figure 2.4 6 mm leak diameter – medium ventilation rate (horizontal plane at leak elevation to the left, vertical cut plane along the analysed section of the terminal (middle) and across the analysed section of the terminal (right))

The main results from the two simulations with a 6 mm leak diameter are presented in Table 2.1 below. Please note that the gas cloud volumes stated in the table below are equivalent stoichiometric gas clouds, as stated in chapter 2.1.

Table 2.1 Results from simulations with the 6 mm diameter

Simulation no.	Diameter of leak [mm]	Ventilation rate	Flammable mass [kg]	Equivalent stoichiometric gas cloud* [m ³]
600001	6	low	0,0178 (< 100 g)	0,0869
600002	6	medium	0,0178 (< 100 g)	0,0873

*based on fuel fraction between LFL and UFL

Once again, these cloud sizes aren't significant and maximal LFL extent is in line with extracted values from ATEX normative reference IP code 15 (see Appendix C). These results show that the dispersion of the resulting plumes from a 6 mm leak is driven by its initial momentum since a very small difference is seen between the two ventilation configurations. Figure 2.5 shows the velocity field close to the release point (same picture with different scales).

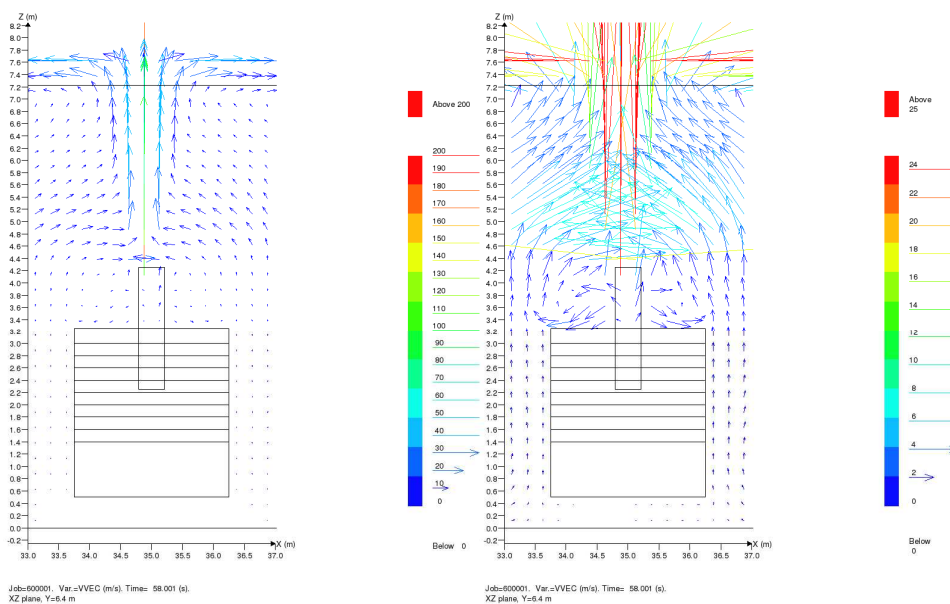


Figure 2.5 Air entrainment into the leak jet, velocity vectors scaled according to the air velocity to the left, velocity vectors scaled according to the leak velocity to the right

In the left part of the picture the velocity vectors have been scaled according to the maximum velocity of the release. To the right the velocity vectors have been scaled according to the air velocities near the leak point. One can see that:

1. there is some air which is entrained in the jet, and the jet prevails over the flow field close to the leak point;
2. away from the leak point, once the release hits the wall, the flow along the ceiling is driven by the ventilation flow field. Figure 4.1 in the conclusion illustrates this phenomenon and show that the plume is already below LFL at this stage.

Given these results and small extents which are observed for the cloud some coarse sensitivity investigations have been carried out. These are provided in Appendix C.

3 Explosion simulation

3.1 Explosion scenario definitions

Two explosion scenarios are defined following the dispersion study and an additional more conservative case proposed by WSP (Figure 3.1 and Figure 3.2; the green cylinder in the figure is a virtual 100 % porous object representing the leak location and doesn't interfere with the simulations):

1. an equivalent stoichiometric cloud including 0.1 kg of fuel gas is defined above the expected location of the leak. This corresponds to a mixture between air and flammable gas with a volume of slightly more than 1 m³. Large overpressures are not expected for this gas cloud given its size, the available expansion potential for the burnt gas and the absence of obstruction and congestion.

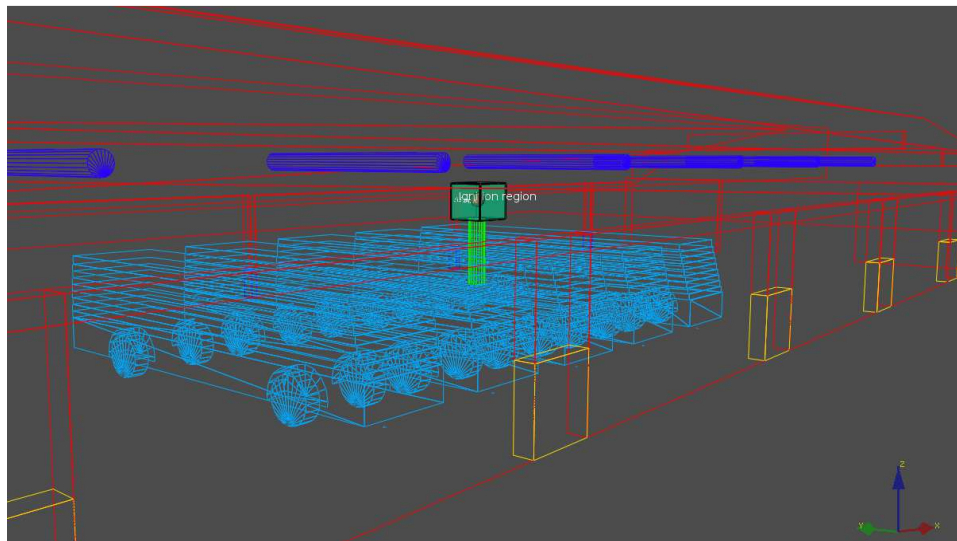


Figure 3.1 0.1 kg fuel gas idealised stoichiometric cloud

2. an equivalent stoichiometric cloud including 10 kg of fuel gas is defined above the expected location of the leak. This scenario was defined by WSP. The shape of the idealized cloud is rectangular, with a prevalent dimension in the X-axis direction to account for the buoyancy of potential release and with the dispersion simulation observations (flow towards the axis of the analysed section of the terminal). Dimensions along the Y- and Z-axis are defined to ensure a conservative assumption in terms of interaction between the burning cloud and the obstacles. Hence the cloud is located between the buses, the ceiling of the analysed section of the terminal and the horizontal ventilation duct. The size of the cloud is approximately 7 m x 5 m x 5 m.

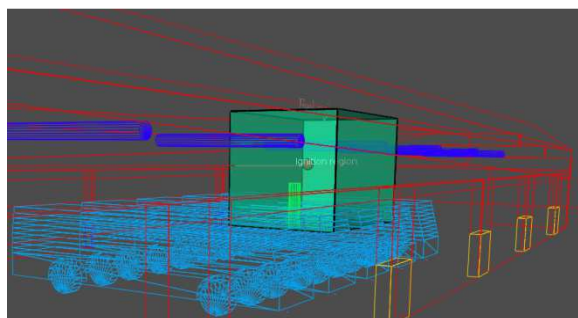
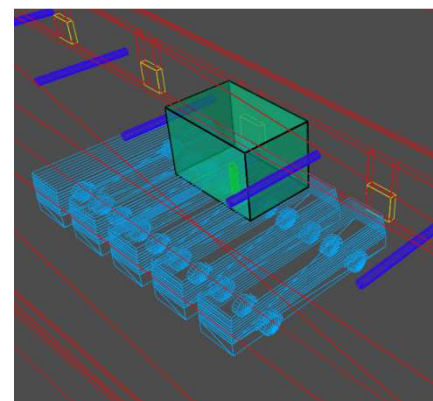


Figure 3.2 10 kg fuel gas idealised stoichiometric cloud



Ignition sensitivity has been investigated. It turned out that no influence is seen on the smallest gas cloud and that central ignition is the most conservative case for the 10 kg stoichiometric gas cloud.

3.2 Monitoring the explosion simulations

This chapter illustrates how the simulations are monitored. Monitor points are located at selected positions to monitor variables as a function of time. In the present explosion simulations, the time dependent overpressure and impulse have been tracked:

1. along the pedestrian way between the waiting hall and the buses. These monitor points are used to measure the potential explosion loads experienced by people who could be located in this area and to confirm the order of magnitude of the averaged overpressure over the walls of the waiting hall (see below, pressure panels). They are located 1.25 m from the wall of the waiting hall at an elevation of 1.5 m. These monitor points are spaced by 2 m along the analysed section of the terminal.

These monitor points are the ones from MP1 to MP35.

2. in the X- and the Y-directions, meaning along and across the analysed section of the terminal, through the centre of the gas cloud at the maximal elevation of the wall of the waiting hall (elevation 4.6 m).

These monitor points are spaced by 0.5 m.

In the X-direction, these monitor points are the ones from MP36 to 172.

In the Y-direction, these monitor points are the ones from MP173 to 213.

Figure 3.3 and Figure 3.4 and illustrates the global location of the monitor points.

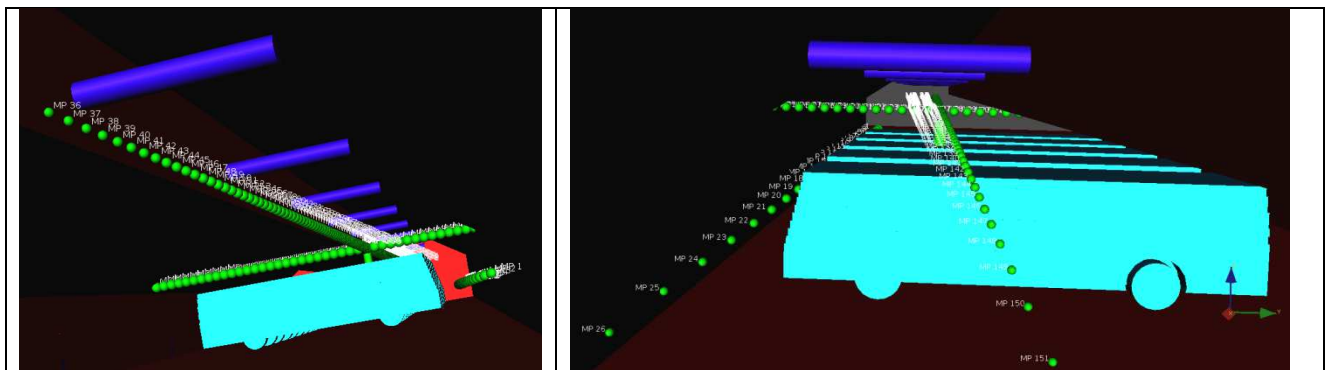


Figure 3.3 3D view of the geometry and monitor points defined in the explosion simulations

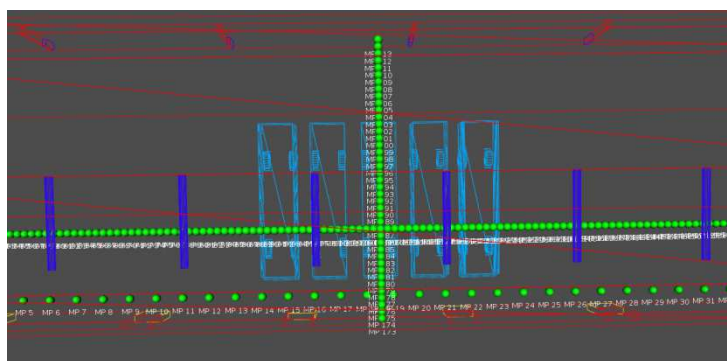


Figure 3.4 Top view of the monitor points

Pressure panels (Figure 3.5) are located along the walls and on the surfaces where the explosion loads are to be monitored.

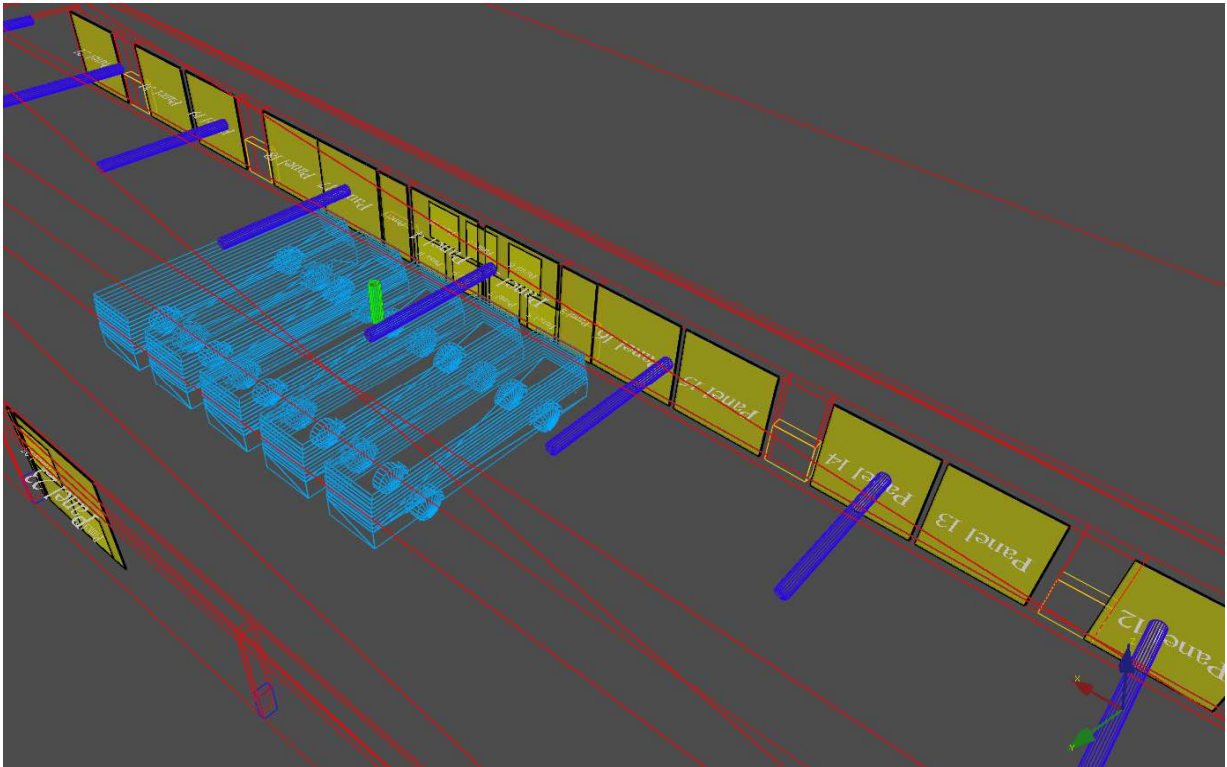
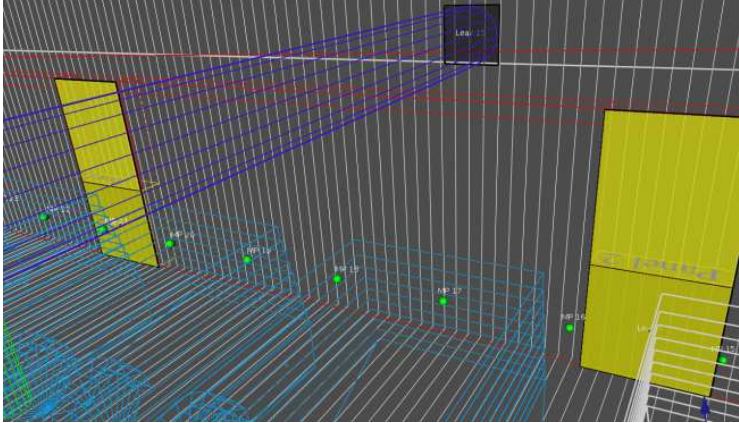
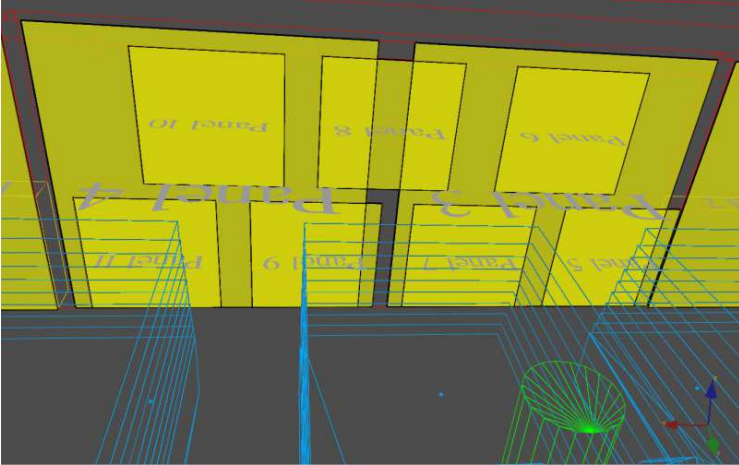
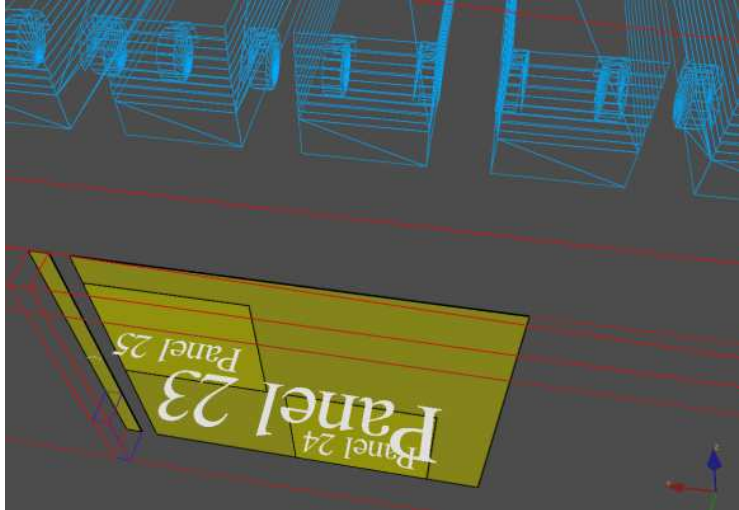


Figure 3.5 3D overview of the pressure panels

Pressure panels allow monitoring a pressure or impulse load over a surface. The signal is averaged across the surface of the panel. It is thus usually interesting to track the explosion loads on various sizes of panels to estimate potential differences between local and global structural behaviour.

In the current explosion simulations, pressure panels have been located according to the following Table 3.1.

Table 3.1: Detailed definition of the pressure panels

Location:	Illustration
on the two pillars facing the explosion on the waiting hall side. These pressure panels are PP1 and PP2. The dimensions of the panels are 2 x 4.5 m.	
on the wall of the waiting hall exactly facing the explosion. Large pressure panels are 4.5 m x 4.5 m. These pressure panels are PP3 and PP4. Smaller pressure panels (2 m x 2 m) are also specified. These are PP5 to PP11.	
on the wall on the opposite side of the waiting room, for information purpose. A combination of large and small pressure panels are used. These are PP22 to PP25.	

Selected variables are also tracked over the whole domain and will be reported in 2D or 3D plots.

3.3 Results of explosion simulations

3.3.1 Introduction

The previous gas clouds are ignited.

As expected, the very small gas cloud burns without any acceleration effect (similar to a flash-fire) and no significant overpressures are recorded over the whole domain (less than 0,005 bar(g) (0.5 KPa), see Figure 3.6). No additional reporting is performed for this case.

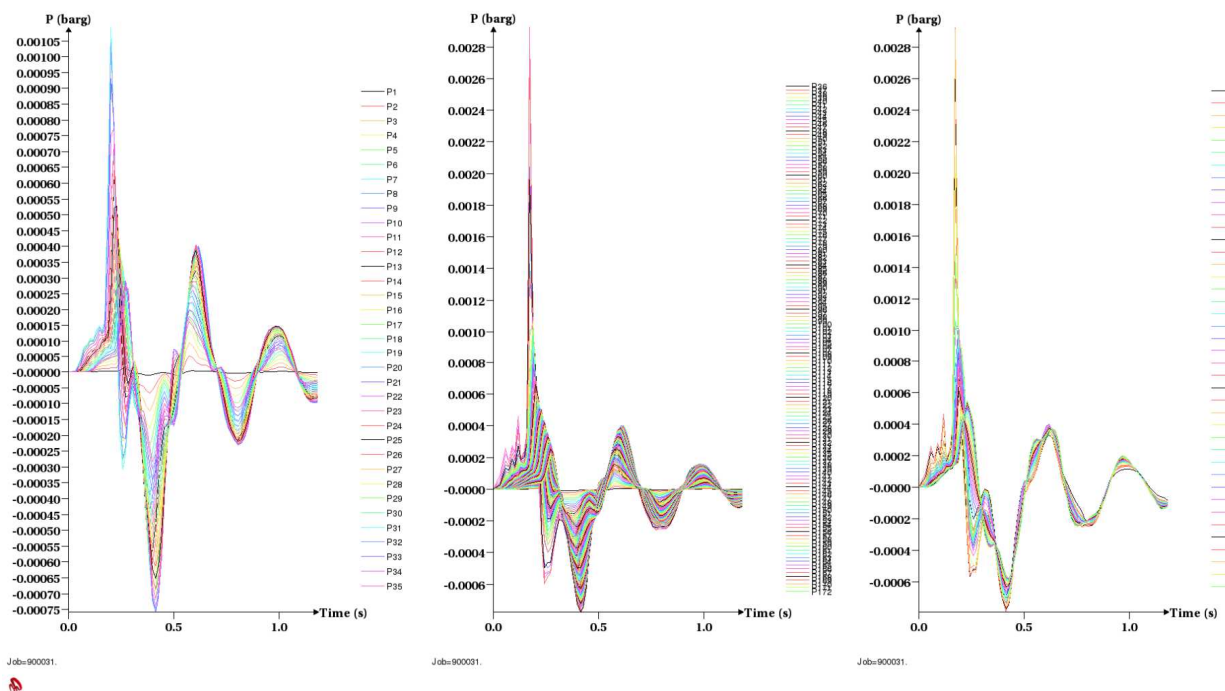


Figure 3.6 Overpressures recorded at all monitor points in the domain for the 0.1 kg fuel gas cloud (left picture for MP from 1 to 35 in the pedestrian way, pictures in the centre and on the right side respectively along and across the analysed section of the terminal at gas cloud elevation)

For the larger gas cloud, multiple ignition point locations have been investigated: central ignition, top ignition between the roof and the ventilation system, ignition between two buses.

The most conservative (central ignition) is reported in the following sections.

3.3.2 Flame propagation

The flame propagation is illustrated in Figure 3.7 for various time steps. The flame front propagates quite homogeneously especially along the analysed section of the terminal, following the ceiling due to the buoyancy.

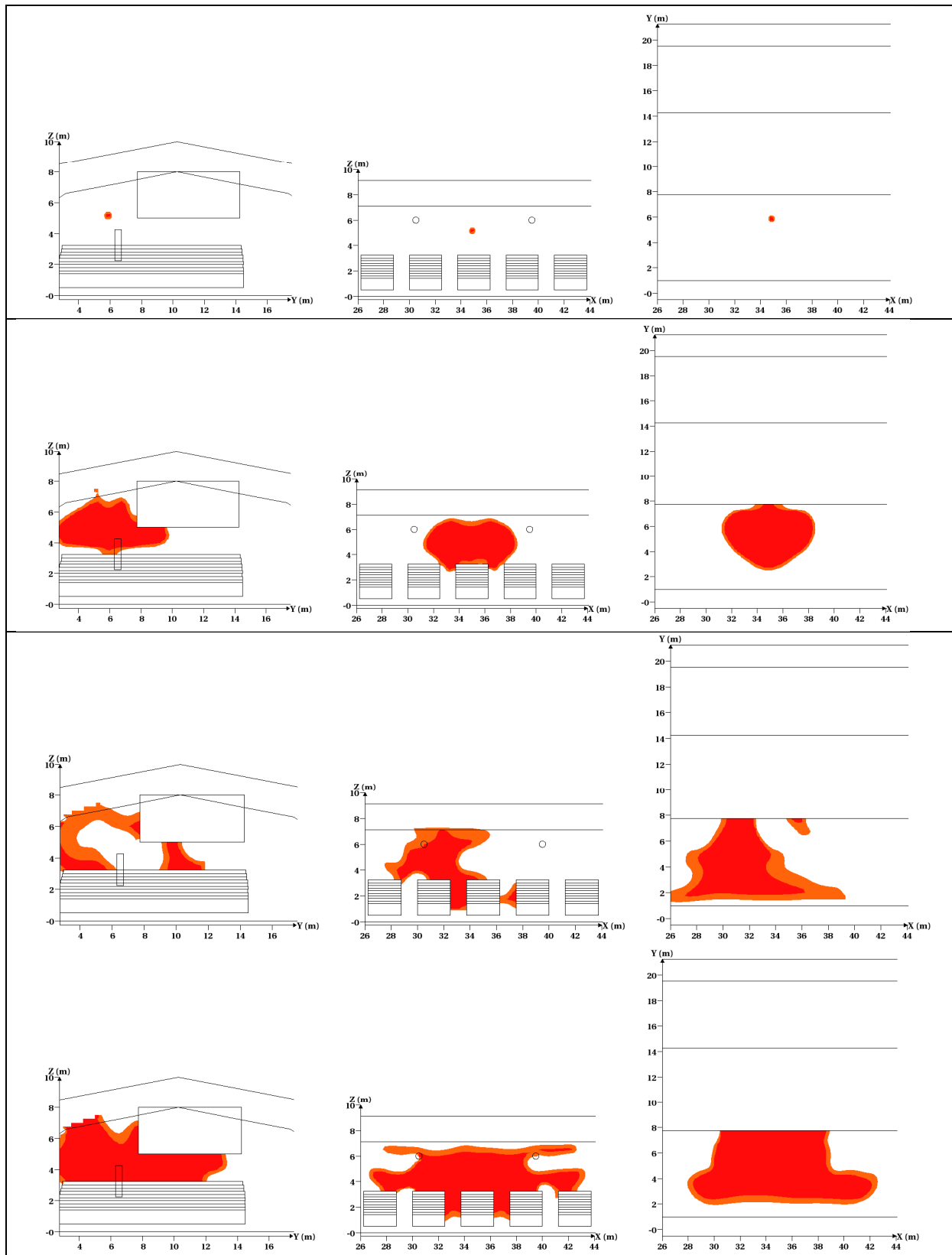


Figure 3.7 Flame propagation illustrated at various time steps. Left pictures: YZ plan across the analysed section of the terminal at ignition location; Central pictures: XZ plan along the analysed section of the terminal at ignition location; Right pictures: Horizontal cut plan at ignition elevation

3.3.3 Overpressure loads

The maximal overpressure recorded in the entire domain is **close to 0.130 bar(g) (13 kPa)**. This evaluation is confirmed by the measurements done at all monitor point locations. Locally, in front of the explosion, the experienced overpressure is generally above 0.1 bar(g) (10 kPa) with a maximum of 0.130 bar(g) (13 kPa). This is typically the case for monitor points 15 to 22 which are located ± 3 m from the gas cloud edges. Figure 3.8 shows the recorded overpressure every 50 cm along and across the analysed section of the terminal. Figure 3.9 shows the overpressures on the pedestrian walkways. Pressure loads on the waiting hall walls will be similar to these values.

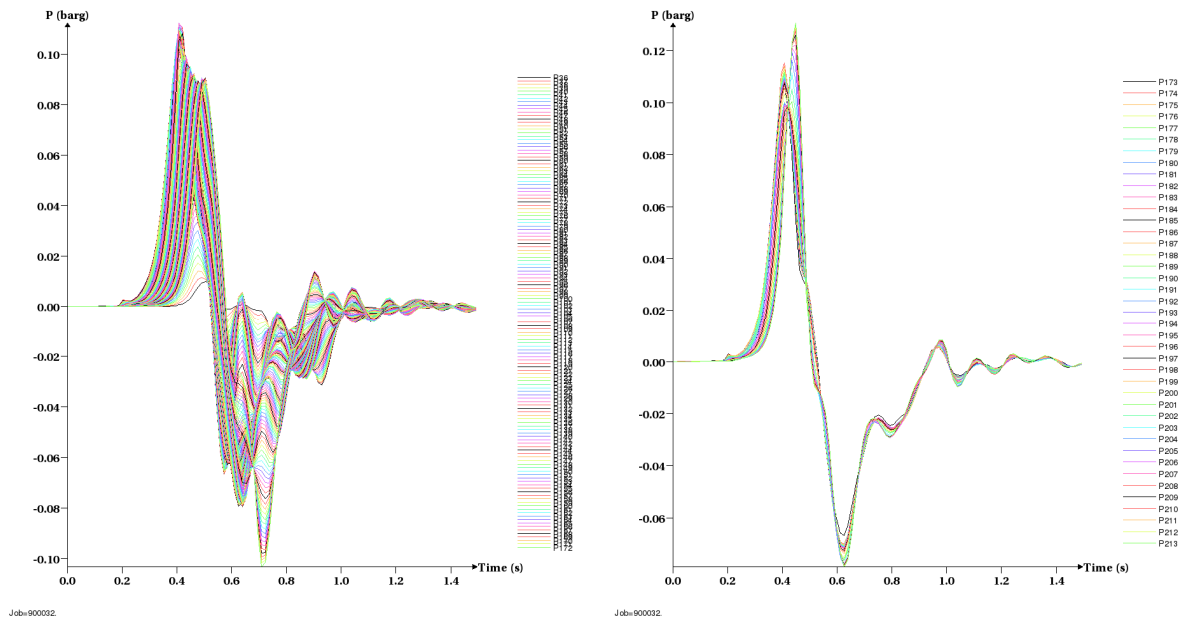


Figure 3.8 Monitored overpressures at all the monitor point locations (every 50 cm) along the analysed section of the terminal (left picture) and across the analysed section of the terminal (right picture) at gas cloud elevation (4.6 m)

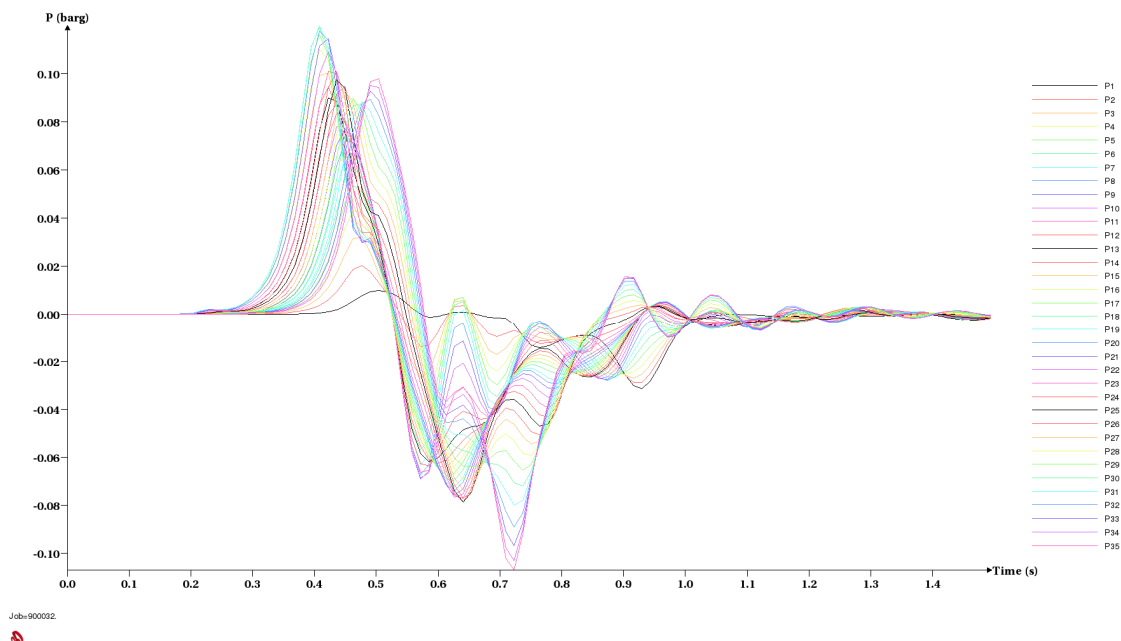


Figure 3.9 Monitored overpressures at all the monitor point locations (every 2 m) along the analysed section of the terminal at pedestrian walkway location

Regarding the pressure loads on the pillars and walls of the waiting hall, Figure 3.10 and Figure 3.11 show the time history overpressures and impulses recorded at several panels of interest, in front of the explosion. Panels are oriented according to axis, meaning that the reported values are negative. Maximal experienced load is in the order of **0.11 to 0.120 bar(g) (11 – 12 kPa)** during approximately **250 ms**. As expected, the local actions are slightly more important than the overall action, especially for impulse. For additional results, presented as graphs and tables, refer to Appendix A.

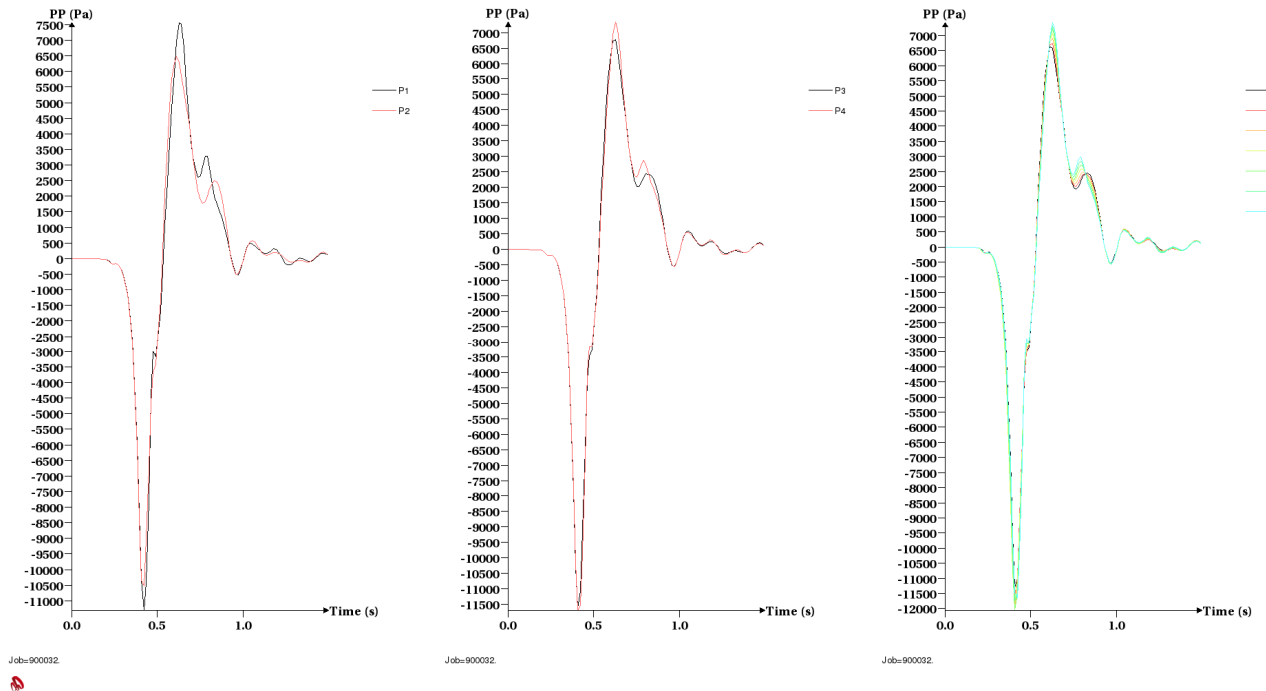


Figure 3.10 Monitored overpressures (Pa) on pressure panels located on pillars (left picture), large panels on the waiting hall walls (centre), and small panels on the waiting hall walls (right picture). 1 bar = 10^5 Pa

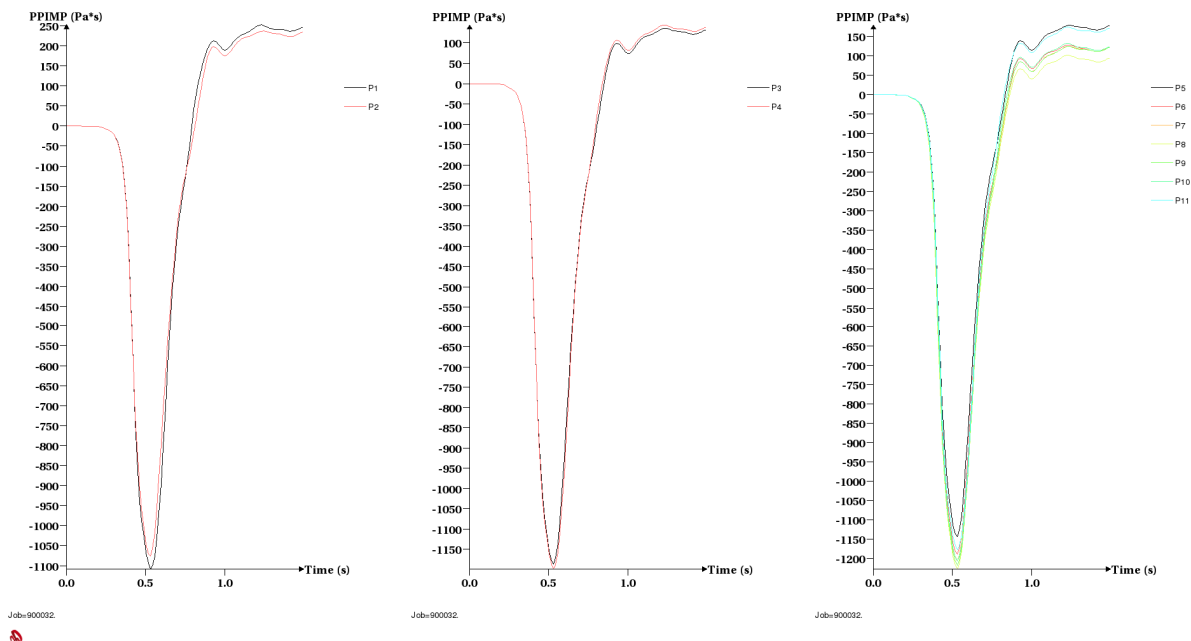


Figure 3.11 Impulses monitored on pressure panels located on pillars (left picture), large panels on the waiting hall walls (centre), and small panels on the waiting hall walls (right picture)

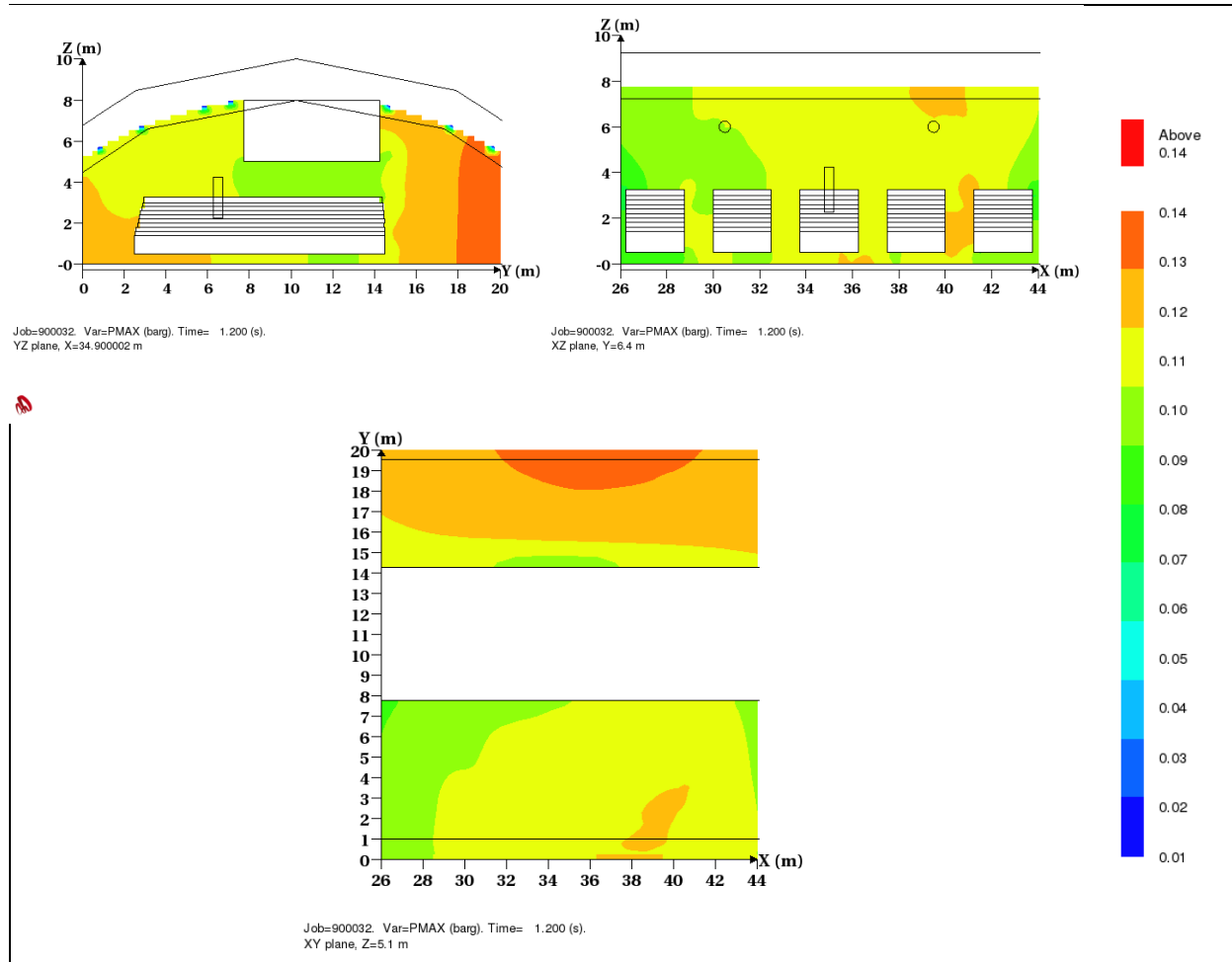


Figure 3.12: 2D plans of the maximal pressure experienced in the domain: YZ vertical plan (top left), XZ vertical plan (top right) and horizontal plan (bottom) centred on gas cloud and ignition point locations

The pressure decay occurs quite quickly in the axis along the analysed section of the terminal since the maximal experienced overpressure is reduced by 25 % approximately outside of the area where the buses are located in the simulation. Based on Figure 3.9, it is also observed that the pressure decrease is not that quick outside of where the buses are located, probably due to a so-called tunnel effect (quasi constant propagation of blast waves) outside the near field of the combustion.

Flow velocities recorded at monitor points along the pedestrian walkways show maximal values above 5 m/s at all locations and significant values above 20 up to 40 m/s in the closest area of the explosion.

Maximal overpressures are observed locally on the two opposite analysed section of the terminal walls in front of the location of the explosion. This is confirmed by the following plots in Figure 3.13 where the maximal experienced overpressure is very close to the one estimated over the whole domain. The duration of the pulse is similar, close to 240 ms. It can be explained by the enhanced propagation of the flame between the buses. This results in a merged blast wave in the free volume behind the buses, and a substantial reflected overpressure on the walls. This is illustrated in Figure 3.14.

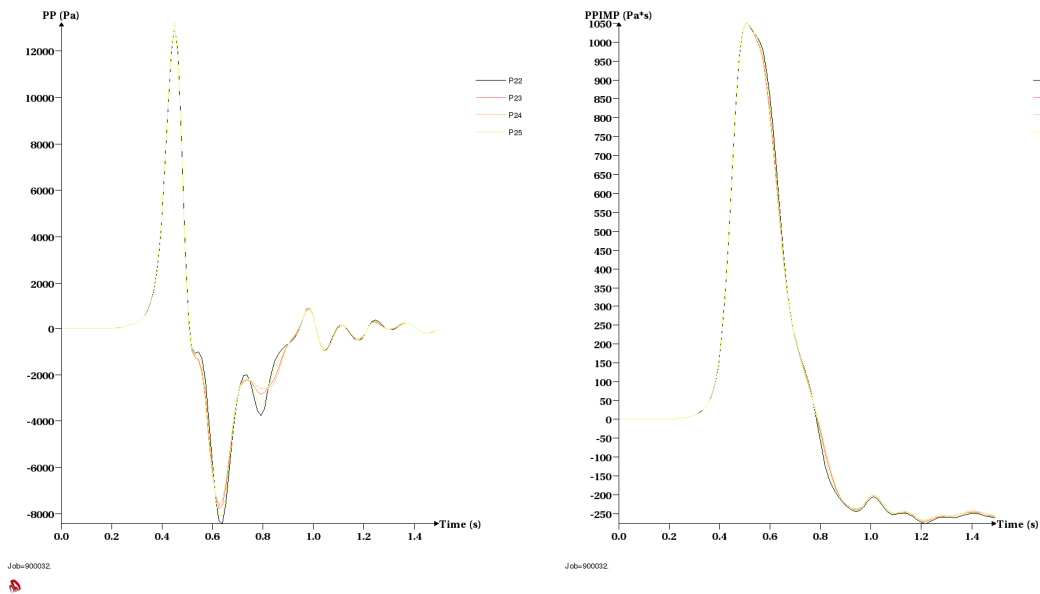


Figure 3.13 Overpressures (left picture) and impulses (right picture) monitored on pressure panels located on the opposite wall of the waiting hall

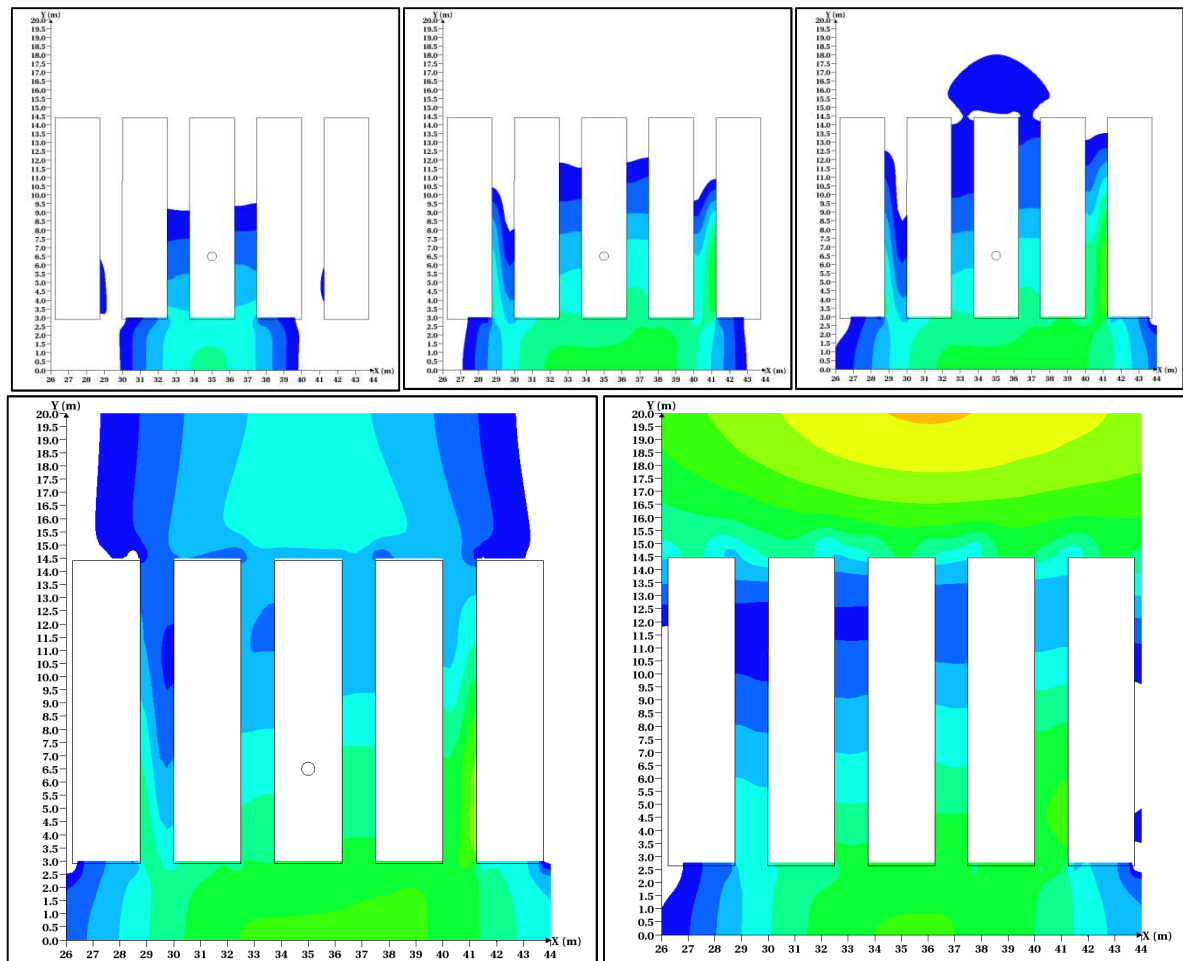


Figure 3.14: Combination of blast corridors along the buses resulting in local loads on opposite wall
Top view of overpressure contours at various time steps (from top left to bottom right)
Overpressures are plotted above 0.090 bar(g) (9 kPa).

4 Conclusion

4.1 Dispersion simulations

The release of a flammable gas from a bus inside a bus terminal has been analysed. The parameters varied in the simulations were the flow rate of the ventilation system, and the leak diameter. None of the dispersion simulations carried out showed proof of significant flammable gas clouds.

The main reasons for the insignificant flammable amounts of gas cloud are the assumed small leak diameters combined with the significant initial pressure in the tank (order of magnitude that are considered within ATEX assessment for example). The small leak diameters lead to small leak rates, initially 0.74 kg/s for the 6 mm leak diameter. The significant initial pressure of the tank leads to a large velocity, approximately 235 m/s for the 6 mm leak diameter. These two factors allow for a jet behaviour in the very early stage of the dispersion and an effective dilution of the plume thanks to air entrainment (see Figure 2.5 and Figure 4.1) afterwards. In addition comes the ventilation system, which also helps mixing the flammable gas with the air (mostly for lower gas concentrations than LFL).

The dilution of the cloud is illustrated in Figure 4.1. In the figure are shown two longitudinal sections through the leak point. In the top part is shown the gas cloud with a concentration between LFL (5.5 vol %) and UFL, at an instant 8 s after the start of the leak. In the lower part of Figure 4.1 is illustrated the gas cloud between 1 vol % and UFL at the same instant.

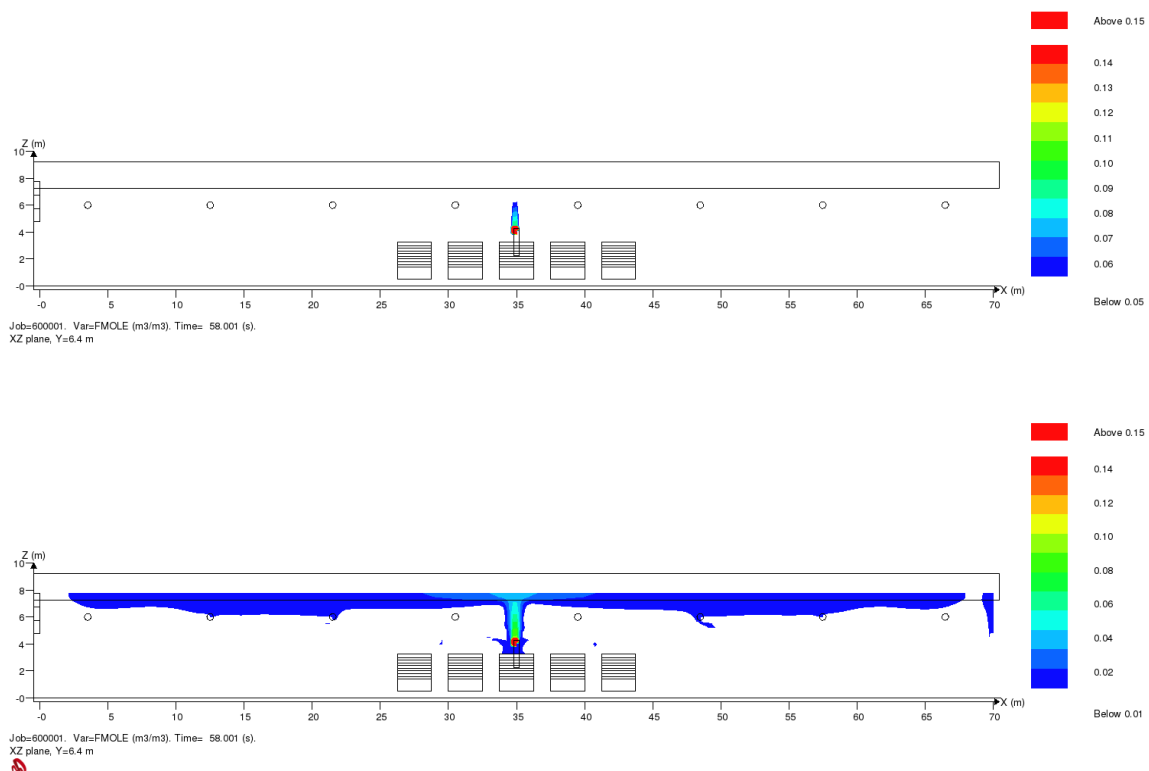


Figure 4.1 The top figure shows the extension of the gas cloud with flammable concentration. The bottom figure shows the gas cloud with a concentration between 1 vol % and UFL.

In Appendix C, some sensitivity investigations are reported.

4.2 Explosion simulations

Two different gas clouds have been considered. Given the low amount of flammable gas resulting from assumed leak diameters, deterministic assumptions have been considered. The first cloud consisted 100 g of methane, the second one of 10 kg of methane.

The combustion of the first cloud is like that of a flash-fire, and no significant overpressures are recorded.

For the larger gas cloud several ignition points have been considered. The most conservative ignition point, central ignition, the maximum measured overpressure is 0.13 bar(g) (13 kPa). This value remains almost constant throughout the area where the combustion takes place, i.e. where the buses are located. Outside of this area the peak pressure decreases to approximately 0.080 to 0.10 bar(g) (8 – 10 kPa) and will remain more or less constant for the remaining stretch of the terminal. This is most likely because of a quasi-constant propagation of blast waves in the analysed section of the terminal, outside the near field of the combustion. In the case of a real explosion this order of magnitude of overpressure will propagate to an adjacent section. On the open side of the analysed section of the terminal the lowest value is likely, and on the side with a reduced cross sectional area the largest value is expected.

Appendix A : Extended explosion results

Below are presented tables with the maximum impulse and overpressure values recorded by all the monitor points and pressure panels in the model during the explosion simulation with 10 kg fuel gas.

Table A. 1 *Impulse and overpressure on monitor points on the pedestrian walkways*

	MP	X	Y	Z	MAX IMPULSE	MAX OVERPRESSURE
					<i>bar.s</i>	<i>bar</i>
<i>Monitor points located on the pedestrian walkways in front of the waiting hall, along the main axis of the analysed section of the terminal</i>	1	0	1.25	1.5	9.11E-04	9.92E-03
	2	2	1.25	1.5	1.67E-03	2.04E-02
	3	4	1.25	1.5	2.59E-03	3.22E-02
	4	6	1.25	1.5	3.50E-03	4.33E-02
	5	8	1.25	1.5	4.38E-03	5.34E-02
	6	10	1.25	1.5	5.22E-03	6.16E-02
	7	12	1.25	1.5	6.02E-03	6.77E-02
	8	14	1.25	1.5	6.75E-03	7.20E-02
	9	16	1.25	1.5	7.42E-03	7.72E-02
	10	18	1.25	1.5	8.01E-03	8.02E-02
	11	20	1.25	1.5	8.54E-03	8.38E-02
	12	22	1.25	1.5	9.01E-03	8.75E-02
	13	24	1.25	1.5	9.40E-03	9.00E-02
	14	26	1.25	1.5	9.68E-03	9.46E-02
	15	28	1.25	1.5	1.03E-02	1.00E-01
	16	30	1.25	1.5	1.10E-02	1.10E-01
	17	32	1.25	1.5	1.17E-02	1.17E-01
	18	34	1.25	1.5	1.21E-02	1.19E-01
	19	36	1.25	1.5	1.22E-02	1.20E-01
	20	38	1.25	1.5	1.18E-02	1.18E-01
	21	40	1.25	1.5	1.13E-02	1.15E-01
	22	42	1.25	1.5	1.07E-02	1.09E-01
	23	44	1.25	1.5	1.02E-02	1.01E-01
	24	46	1.25	1.5	1.02E-02	1.01E-01
	25	48	1.25	1.5	1.02E-02	9.75E-02
	26	50	1.25	1.5	1.01E-02	9.49E-02
	27	52	1.25	1.5	1.01E-02	9.29E-02
	28	54	1.25	1.5	1.01E-02	9.00E-02
	29	56	1.25	1.5	1.00E-02	8.95E-02
	30	58	1.25	1.5	9.93E-03	8.74E-02
	31	60	1.25	1.5	9.85E-03	8.85E-02
	32	62	1.25	1.5	9.76E-03	8.94E-02
	33	64	1.25	1.5	9.65E-03	9.29E-02
	34	66	1.25	1.5	9.57E-03	9.52E-02
	35	68	1.25	1.5	9.53E-03	9.79E-02

Projection of ignition
location X=35 m

Table A. 2 *Impulse and overpressure on monitor points along the analysed section of the terminal at ignition elevation (top of wall), continued on 2 additional pages*

	MP	X	Y	Z	MAX IMPULSE	MAX OVERPRESSURE
					<i>bar.s</i>	<i>bar</i>
<i>Monitor points located at ignition elevation (top of wall max elevation), along the analysed section of the terminal</i>	36	0	6.5	4.6	8.83E-04	1.00E-02
	37	0.5	6.5	4.6	1.03E-03	1.17E-02
	38	1	6.5	4.6	1.22E-03	1.42E-02
	39	1.5	6.5	4.6	1.41E-03	1.74E-02
	40	2	6.5	4.6	1.62E-03	2.06E-02
	41	2.5	6.5	4.6	1.84E-03	2.37E-02
	42	3	6.5	4.6	2.07E-03	2.68E-02
	43	3.5	6.5	4.6	2.34E-03	3.01E-02
	44	4	6.5	4.6	2.62E-03	3.36E-02
	45	4.5	6.5	4.6	2.87E-03	3.67E-02
	46	5	6.5	4.6	3.11E-03	3.94E-02
	47	5.5	6.5	4.6	3.33E-03	4.20E-02
	48	6	6.5	4.6	3.55E-03	4.45E-02
	49	6.5	6.5	4.6	3.77E-03	4.68E-02
	50	7	6.5	4.6	3.99E-03	4.93E-02
	51	7.5	6.5	4.6	4.22E-03	5.18E-02
	52	8	6.5	4.6	4.43E-03	5.42E-02
	53	8.5	6.5	4.6	4.65E-03	5.66E-02
	54	9	6.5	4.6	4.86E-03	5.88E-02
	55	9.5	6.5	4.6	5.07E-03	6.08E-02
	56	10	6.5	4.6	5.27E-03	6.28E-02
	57	10.5	6.5	4.6	5.46E-03	6.46E-02
	58	11	6.5	4.6	5.65E-03	6.63E-02
	59	11.5	6.5	4.6	5.84E-03	6.78E-02
	60	12	6.5	4.6	6.02E-03	6.92E-02
	61	12.5	6.5	4.6	6.24E-03	7.08E-02
	62	13	6.5	4.6	6.46E-03	7.23E-02
	63	13.5	6.5	4.6	6.65E-03	7.36E-02
	64	14	6.5	4.6	6.83E-03	7.45E-02
	65	14.5	6.5	4.6	6.99E-03	7.53E-02
	66	15	6.5	4.6	7.15E-03	7.59E-02
	67	15.5	6.5	4.6	7.31E-03	7.71E-02
	68	16	6.5	4.6	7.46E-03	7.83E-02
	69	16.5	6.5	4.6	7.60E-03	7.94E-02
	70	17	6.5	4.6	7.74E-03	8.04E-02
	71	17.5	6.5	4.6	7.88E-03	8.13E-02
	72	18	6.5	4.6	8.01E-03	8.20E-02
	73	18.5	6.5	4.6	8.14E-03	8.26E-02
	74	19	6.5	4.6	8.25E-03	8.30E-02
	75	19.5	6.5	4.6	8.36E-03	8.32E-02
	76	20	6.5	4.6	8.46E-03	8.33E-02
	77	20.5	6.5	4.6	8.54E-03	8.38E-02
	78	21	6.5	4.6	8.64E-03	8.48E-02
	79	21.5	6.5	4.6	8.77E-03	8.61E-02
	80	22	6.5	4.6	8.90E-03	8.73E-02
	81	22.5	6.5	4.6	9.00E-03	8.82E-02
	82	23	6.5	4.6	9.07E-03	8.87E-02
	83	23.5	6.5	4.6	9.12E-03	8.88E-02
	84	24	6.5	4.6	9.14E-03	8.86E-02
	85	24.5	6.5	4.6	9.17E-03	8.80E-02
	86	25	6.5	4.6	9.21E-03	8.90E-02
	87	25.5	6.5	4.6	9.28E-03	8.97E-02
	88	26	6.5	4.6	9.41E-03	9.07E-02

					MAX IMPULSE	MAX OVERPRESSURE
	MP	X	Y	Z	<i>bar.s</i>	<i>bar</i>
	89	26.5	6.5	4.6	9.58E-03	9.21E-02
	90	27	6.5	4.6	9.81E-03	9.37E-02
	91	27.5	6.5	4.6	1.01E-02	9.51E-02
	92	28	6.5	4.6	1.03E-02	9.85E-02
	93	28.5	6.5	4.6	1.06E-02	1.01E-01
	94	29	6.5	4.6	1.08E-02	1.02E-01
	95	29.5	6.5	4.6	1.10E-02	1.02E-01
	96	30	6.5	4.6	1.12E-02	1.02E-01
	97	30.5	6.5	4.6	1.15E-02	1.02E-01
	98	31	6.5	4.6	1.18E-02	1.03E-01
	99	31.5	6.5	4.6	1.20E-02	1.04E-01
	100	32	6.5	4.6	1.22E-02	1.04E-01
	101	32.5	6.5	4.6	1.24E-02	1.05E-01
	102	33	6.5	4.6	1.25E-02	1.05E-01
	103	33.5	6.5	4.6	1.26E-02	1.06E-01
	104	34	6.5	4.6	1.26E-02	1.06E-01
	105	34.5	6.5	4.6	1.26E-02	1.06E-01
	106	35	6.5	4.6	1.27E-02	1.07E-01
	107	35.5	6.5	4.6	1.26E-02	1.07E-01
	108	36	6.5	4.6	1.26E-02	1.08E-01
	109	36.5	6.5	4.6	1.26E-02	1.08E-01
	110	37	6.5	4.6	1.25E-02	1.09E-01
	111	37.5	6.5	4.6	1.24E-02	1.09E-01
	112	38	6.5	4.6	1.23E-02	1.10E-01
	113	38.5	6.5	4.6	1.22E-02	1.10E-01
	114	39	6.5	4.6	1.20E-02	1.11E-01
	115	39.5	6.5	4.6	1.18E-02	1.11E-01
	116	40	6.5	4.6	1.15E-02	1.12E-01
	117	40.5	6.5	4.6	1.14E-02	1.13E-01
	118	41	6.5	4.6	1.12E-02	1.12E-01
	119	41.5	6.5	4.6	1.09E-02	1.11E-01
	120	42	6.5	4.6	1.07E-02	1.08E-01
	121	42.5	6.5	4.6	1.04E-02	1.07E-01
	122	43	6.5	4.6	1.01E-02	1.05E-01
	123	43.5	6.5	4.6	9.90E-03	1.02E-01
	124	44	6.5	4.6	9.76E-03	9.97E-02
	125	44.5	6.5	4.6	9.70E-03	9.79E-02
	126	45	6.5	4.6	9.68E-03	9.83E-02
	127	45.5	6.5	4.6	9.70E-03	9.89E-02
	128	46	6.5	4.6	9.76E-03	9.91E-02
	129	46.5	6.5	4.6	9.84E-03	9.89E-02
	130	47	6.5	4.6	9.91E-03	9.84E-02
	131	47.5	6.5	4.6	9.95E-03	9.74E-02
	132	48	6.5	4.6	9.95E-03	9.60E-02
	133	48.5	6.5	4.6	9.93E-03	9.47E-02
	134	49	6.5	4.6	9.90E-03	9.48E-02
	135	49.5	6.5	4.6	9.91E-03	9.51E-02
	136	50	6.5	4.6	9.95E-03	9.52E-02
	137	50.5	6.5	4.6	9.99E-03	9.50E-02
	138	51	6.5	4.6	1.00E-02	9.46E-02
	139	51.5	6.5	4.6	1.00E-02	9.40E-02
	140	52	6.5	4.6	1.00E-02	9.32E-02
	141	52.5	6.5	4.6	1.00E-02	9.22E-02
	142	53	6.5	4.6	1.00E-02	9.20E-02
	143	53.5	6.5	4.6	1.00E-02	9.24E-02

					MAX IMPULSE	MAX OVERPRESSURE
					<i>bar.s</i>	<i>bar</i>
	MP	X	Y	Z		
	144	54	6.5	4.6	1.00E-02	9.25E-02
	145	54.5	6.5	4.6	1.00E-02	9.25E-02
	146	55	6.5	4.6	1.00E-02	9.23E-02
	147	55.5	6.5	4.6	1.00E-02	9.19E-02
	148	56	6.5	4.6	9.98E-03	9.14E-02
	149	56.5	6.5	4.6	9.95E-03	9.06E-02
	150	57	6.5	4.6	9.91E-03	8.96E-02
	151	57.5	6.5	4.6	9.86E-03	8.93E-02
	152	58	6.5	4.6	9.80E-03	8.94E-02
	153	58.5	6.5	4.6	9.78E-03	8.96E-02
	154	59	6.5	4.6	9.76E-03	8.97E-02
	155	59.5	6.5	4.6	9.74E-03	8.97E-02
	156	60	6.5	4.6	9.72E-03	8.94E-02
	157	60.5	6.5	4.6	9.68E-03	8.90E-02
	158	61	6.5	4.6	9.64E-03	8.85E-02
	159	61.5	6.5	4.6	9.60E-03	8.92E-02
	160	62	6.5	4.6	9.55E-03	8.98E-02
	161	62.5	6.5	4.6	9.50E-03	9.02E-02
	162	63	6.5	4.6	9.45E-03	9.05E-02
	163	63.5	6.5	4.6	9.39E-03	9.06E-02
	164	64	6.5	4.6	9.33E-03	9.06E-02
	165	64.5	6.5	4.6	9.26E-03	9.04E-02
	166	65	6.5	4.6	9.18E-03	9.01E-02
	167	65.5	6.5	4.6	9.09E-03	9.06E-02
	168	66	6.5	4.6	8.99E-03	9.07E-02
	169	66.5	6.5	4.6	8.86E-03	9.05E-02
	170	67	6.5	4.6	8.72E-03	9.01E-02
	171	67.5	6.5	4.6	8.57E-03	8.95E-02
	172	68	6.5	4.6	8.41E-03	8.83E-02

Table A.3 *Impulse and overpressure on monitor points across the analysed section of the terminal at ignition elevation (top of wall)*

	MP	X	Y	Z	MAX	MAX
					IMPULSE	OVERPRESSURE
					<i>bar.s</i>	<i>bar</i>
<i>Monitor points located at ignition elevation (top of wall max elevation), across the analysed section of the terminal</i>	173	35	0	4.6	1.14E-02	1.07E-01
	174	35	0.5	4.6	1.23E-02	1.15E-01
	175	35	1	4.6	1.23E-02	1.14E-01
	176	35	1.5	4.6	1.23E-02	1.13E-01
	177	35	2	4.6	1.24E-02	1.12E-01
	178	35	2.5	4.6	1.24E-02	1.11E-01
	179	35	3	4.6	1.25E-02	1.10E-01
	180	35	3.5	4.6	1.26E-02	1.10E-01
	181	35	4	4.6	1.27E-02	1.09E-01
	182	35	4.5	4.6	1.27E-02	1.09E-01
	183	35	5	4.6	1.27E-02	1.08E-01
	184	35	5.5	4.6	1.27E-02	1.08E-01
	185	35	6	4.6	1.27E-02	1.08E-01
	186	35	6.5	4.6	1.27E-02	1.07E-01
	187	35	7	4.6	1.26E-02	1.05E-01
	188	35	7.5	4.6	1.24E-02	1.03E-01
	189	35	8	4.6	1.21E-02	1.00E-01
	190	35	8.5	4.6	1.19E-02	9.98E-02
	191	35	9	4.6	1.18E-02	9.99E-02
	192	35	9.5	4.6	1.17E-02	9.97E-02
	193	35	10	4.6	1.15E-02	9.94E-02
	194	35	10.5	4.6	1.13E-02	9.90E-02
	195	35	11	4.6	1.11E-02	9.91E-02
	196	35	11.5	4.6	1.09E-02	9.91E-02
	197	35	12	4.6	1.07E-02	9.92E-02
	198	35	12.5	4.6	1.05E-02	9.95E-02
	199	35	13	4.6	1.02E-02	9.98E-02
	200	35	13.5	4.6	9.88E-03	9.94E-02
	201	35	14	4.6	9.67E-03	1.00E-01
	202	35	14.5	4.6	9.78E-03	1.05E-01
	203	35	15	4.6	9.92E-03	1.11E-01
	204	35	15.5	4.6	1.01E-02	1.16E-01
	205	35	16	4.6	1.02E-02	1.19E-01
	206	35	16.5	4.6	1.03E-02	1.21E-01
	207	35	17	4.6	1.04E-02	1.22E-01
	208	35	17.5	4.6	1.04E-02	1.24E-01
	209	35	18	4.6	1.04E-02	1.26E-01
	210	35	18.5	4.6	1.05E-02	1.28E-01
	211	35	19	4.6	1.05E-02	1.29E-01
	212	35	19.5	4.6	1.05E-02	1.30E-01
	213	35	20	4.6	1.05E-02	1.31E-01

Table A. 4 Impulse and overpressure on monitoring panels

PP	Description	MAX IMPULSE <i>bar.s</i>	MAX P <i>bar</i>
1	Left pillar in front of gas cloud	1.11E-02	1.13E-01
2	Right pillar in front of gas cloud	1.08E-02	1.05E-01
3	Large panels (4.5 m x 4.5 m) in front of the gas cloud	1.19E-02	1.16E-01
4		1.20E-02	1.17E-01
5	Small panels (2 x 2 m)	1.14E-02	1.13E-01
6		1.19E-02	1.16E-01
7		1.21E-02	1.20E-01
8		1.23E-02	1.18E-01
9		1.22E-02	1.20E-01
10		1.21E-02	1.17E-01
11		1.18E-02	1.17E-01
12	Large panels along the length of the analysed section of the terminal, starting at X min (PP12) up to X max (PP21)	3.76E-03	2.82E-02
13		4.91E-03	5.79E-02
14		6.75E-03	7.18E-02
15		8.78E-03	8.50E-02
16		9.78E-03	9.48E-02
17		1.03E-02	1.02E-01
18		1.01E-02	9.53E-02
19		9.99E-03	8.85E-02
20		9.81E-03	8.77E-02
21		9.02E-03	1.02E-01
22	Panels in the opposite wall (pillar PP22, large panel (PP23) and small panels (PP24 and 25))	1.05E-02	1.32E-01
23		1.05E-02	1.32E-01
24		1.05E-02	1.32E-01
25		1.05E-02	1.32E-01

Figure A. 1 and Figure A. 2 below present the time-history impulse and overpressure recorded by a monitor point 5 m, 6 m, 7 m and 8 m from the centre of the gas cloud in the length direction of the terminal. The X coordinate of the gas cloud centre was 35 m (where ignition was also located). Hence it can be seen from Table A. 2 that monitor point no. 116 is located 5 m from the centre of the cloud.

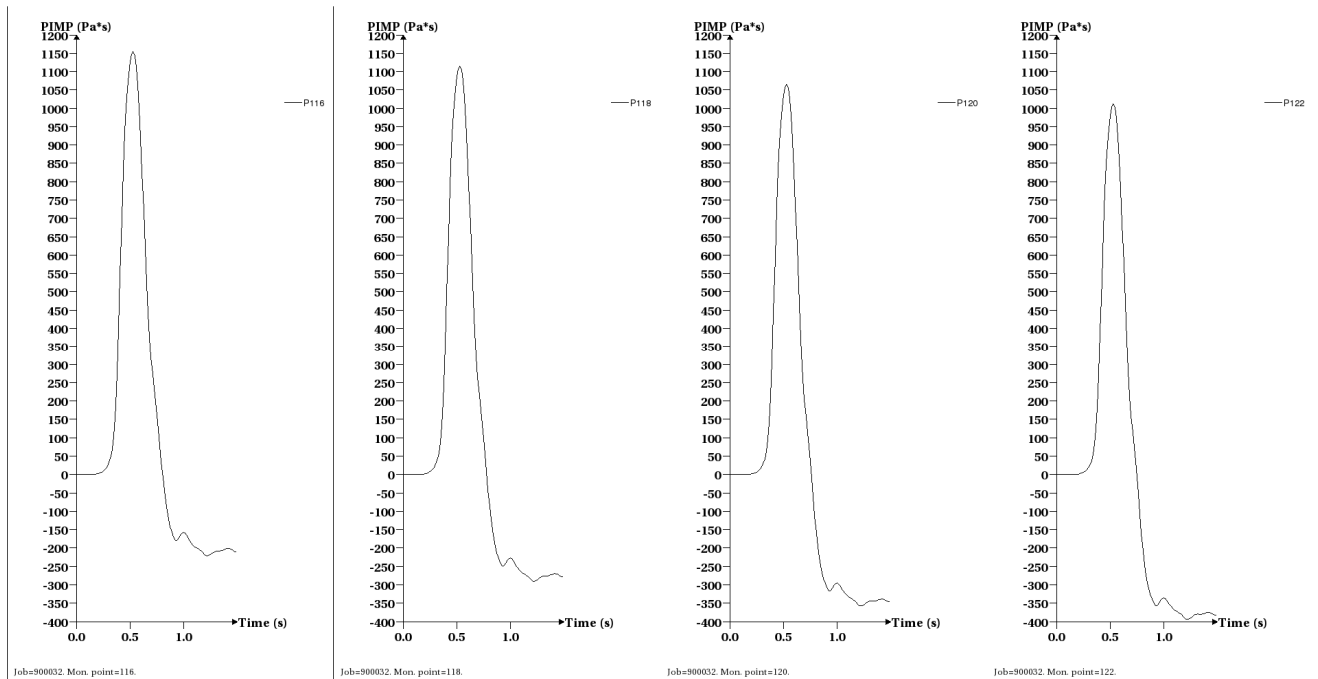


Figure A. 1 Impulse on a monitor point 5 m, 6 m, 7 m and 8 m from the centre of the cloud

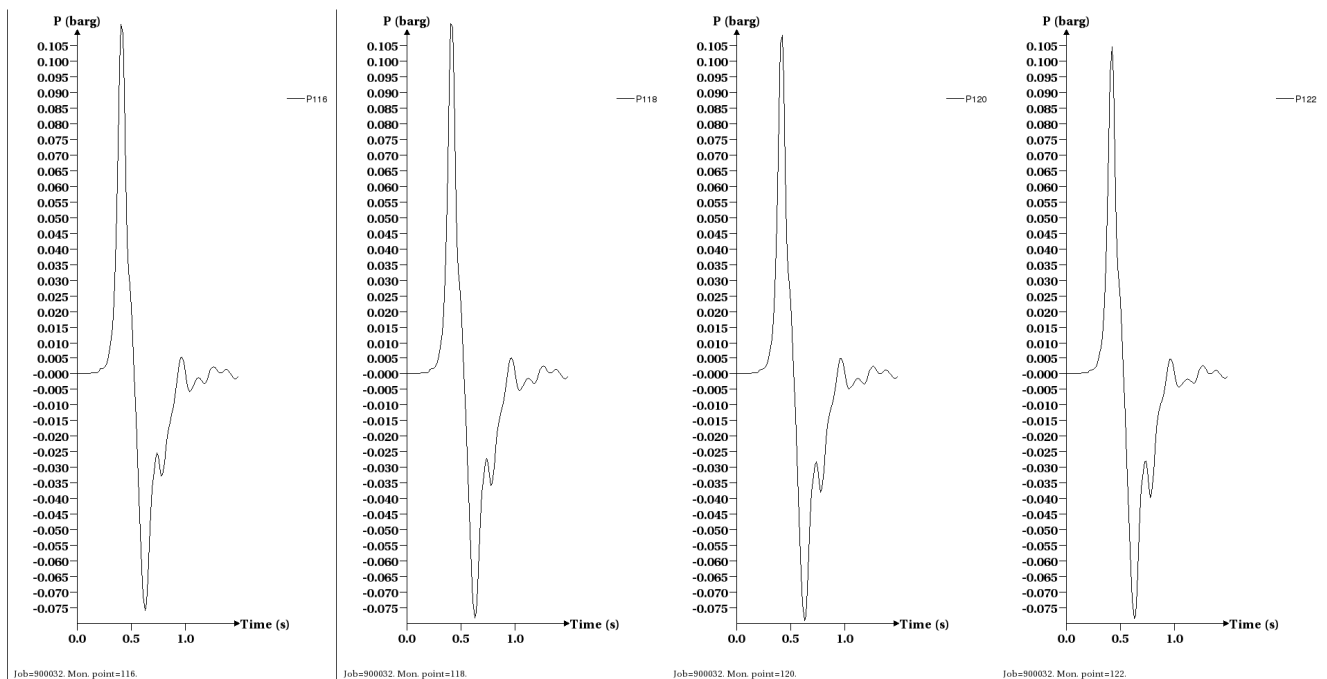


Figure A. 2 Overpressure on a monitor point 5 m, 6 m, 7 m and 8 m from the centre of the cloud

In Figure A. 3 is shown the maximum overpressure as measured by monitor points on the pedestrian walkway, starting from the unobstructed west end of the terminal to the partially blocked end in the east. As can be seen, the pressure distribution inside the terminal is not symmetrical. This is due to the facts that:

- One of the openings of the analysed section of the terminal is virtually open, whereas in reality the cross section is continuous.
- The other opening has a reduced cross sectional area

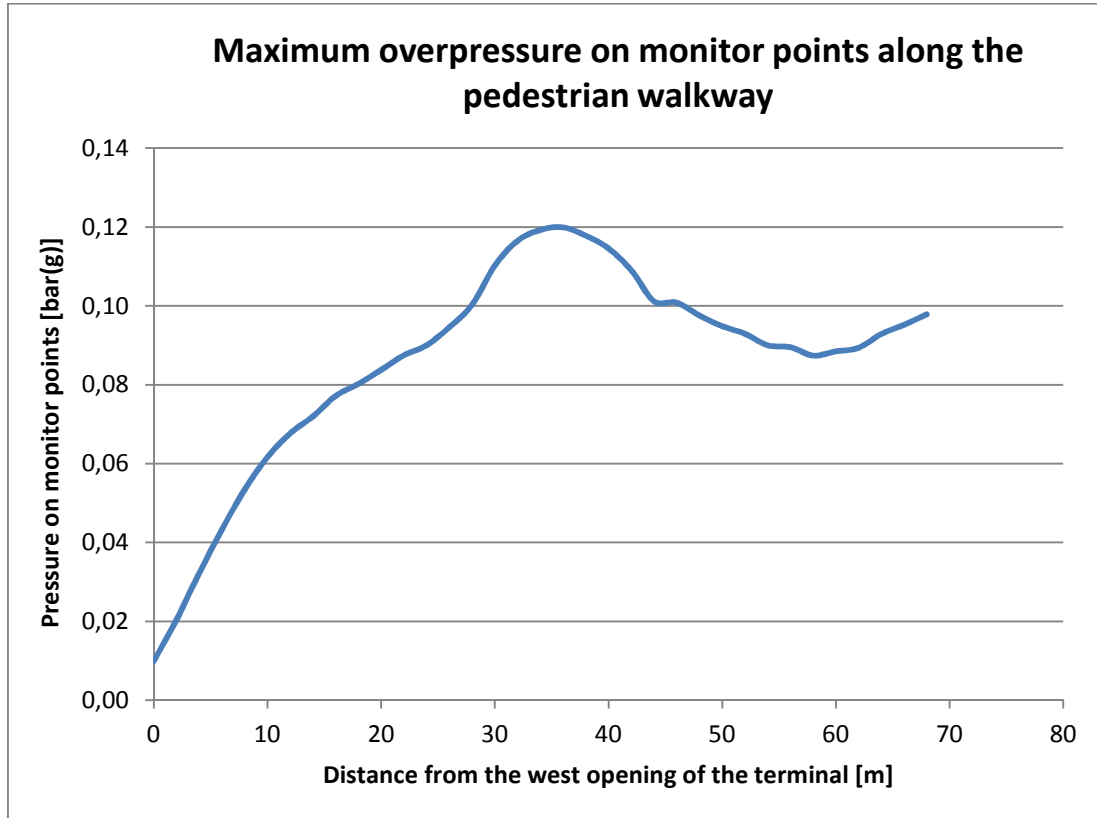


Figure A. 3 Maximum overpressure on monitor points along the pedestrian walkway

Appendix B Brief technical description of the FLACS CFD solver and FLACS solver validation

- For a technical description of the FLACS CFD solver please refer to the document “Modelling in FLACS – a brief overview” (10 pages).
- For validation of the FLACS CFD solver please refer to the document “Summary of FLACS validation” (22 pages).

Appendix C Uncertainties and coarse sensitivity assessment

C 1 FLACS uncertainties

As a major CFD product, FLACS has been extensively validated (see previous Appendix).

The common good practice when validating a tool against experiments is to consider a +/- 30% difference as a reasonable agreement. In terms of safety, it is always recommended to be located on the safest side of this range.

Note that FLACS has frequently achieved a higher score of +/-10 % agreement with experiments especially for small releases.

Considering this study, applying a very conservative 30 % error margin will not modify significantly the results.

The results from the dispersion will still be covered by the conservative assumption considered by WSP (a 10 kg flammable mixture gas cloud) for the explosion phase.

Applying this error of magnitude to the explosion simulations will not change significantly the range of the explosion loads (0.170 mbar(g) or 17 kPa).

Note that given the range of the observed results, GexCon has used rather simplified methodologies in order to challenge the FLACS outputs. These are summarized in the next chapter.

C 2 Coarse sensitivity assessment on results

C 2.1 Dispersion

As per WSP additional request, a sensitivity analysis has also been carried out to reinforce the reported results:

- a simplified geometry and refined grid definitions have been considered within FLACS, with both 10 cm and 5 cm grid resolutions.

These simulations gave gas clouds with flammable mass with the same order of magnitude (< 100 g) and same extent as those reported above (close to ~4 m), see Figure 2.4 and Figure A. 4. In Figure A. 5 is shown the air entrainment into the jet, in the simulation with a 5 cm grid resolution.

The jet look more tilted but this is mostly due to the wind definition which has been specified to match the value observed in the real geometry simulation but doesn't take the ventilation system into account. Transposed in the studied section of the tunnel, these plumes are thus supposed to be even smaller.

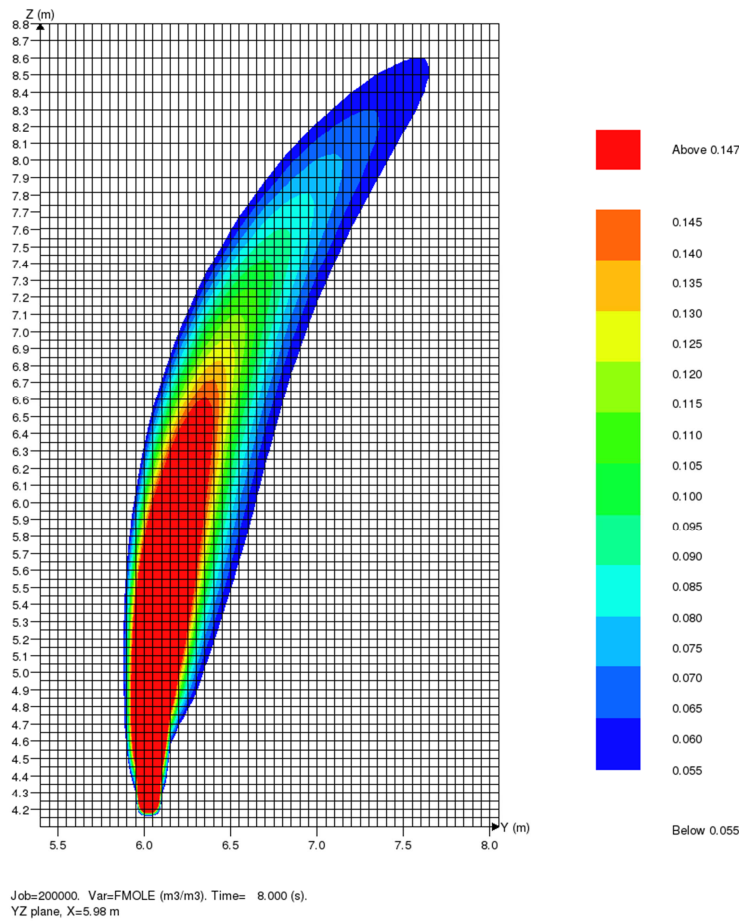


Figure A. 4 Extension of flammable (gas concentration between LFL and UFL) gas cloud with simplified geometry and refined grid

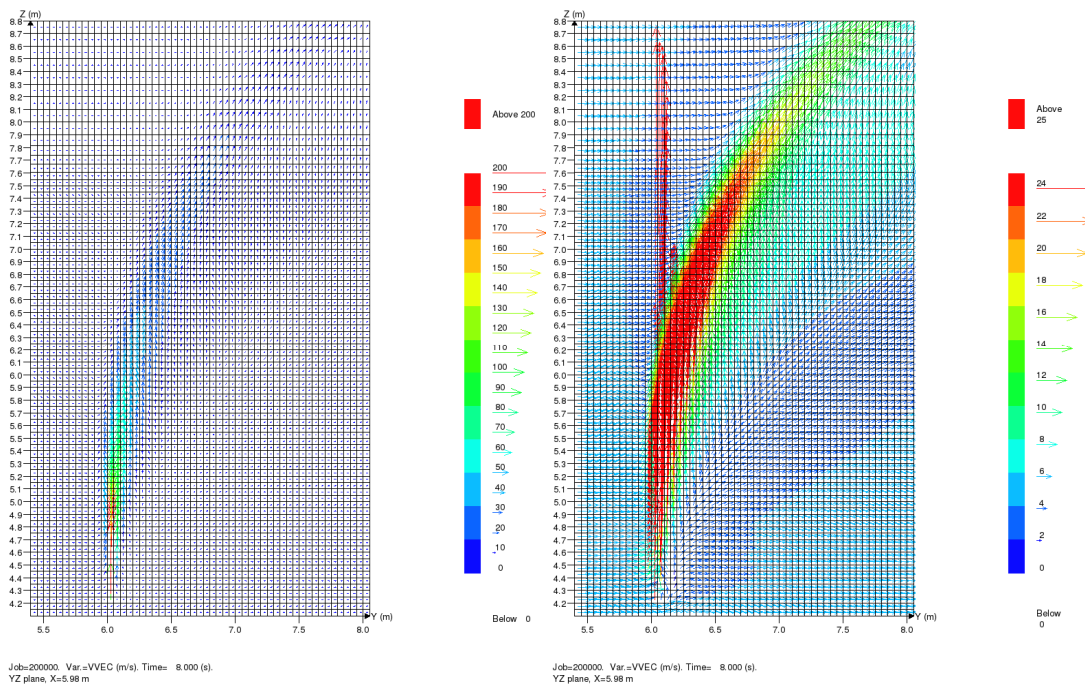


Figure A. 5 Air entrainment into the leak jet, velocity vectors scaled according to the air velocity to the left, velocity vectors scaled according to the leak velocity to the right

- with a simplified integral tool which doesn't account for the geometry and the topography, PHAST: the maximal release rate is close to 0.79 kg/s and the flammable extent is close to 4 m in the vertical axis. The crosswind extent is close to 0.8 m. No accumulated flammable mass is reported.

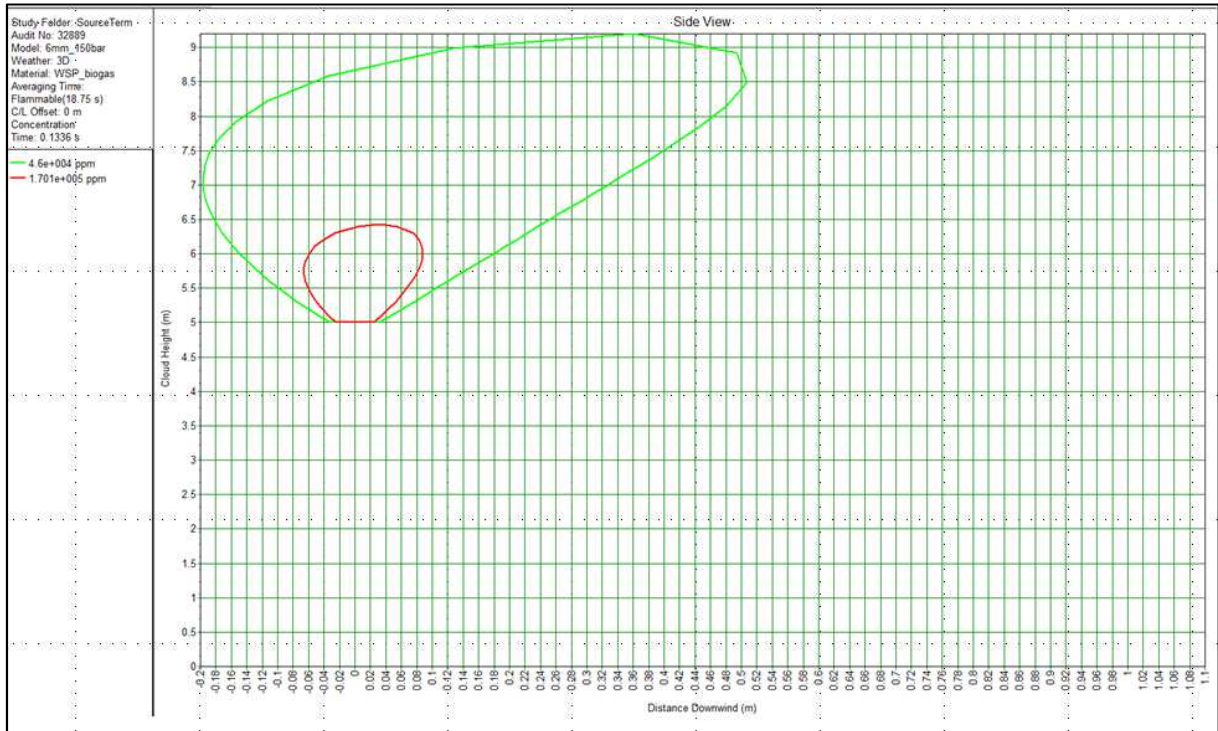


Figure A. 6 Air entrainment into the leak jet, velocity vectors scaled according to the air velocity to the left, velocity vectors scaled according to the leak velocity to the right

- with a reference to a common standard of the oil and gas industry dealing with explosive atmosphere certification (ATEX standard), the IP (International Protection) Standard Part 15: *Area classification code for installations handling flammable fluids*.

This standard is used as a conservative basis when there is a need to perform some area classification in connection with flammable hazards. This standard provides some normative tables and values to be used when experiments or simulations cannot be performed.

The extracted table () show the extent of the flammable hazard area depending on the fluid category (A, B, C, D, G(i) and G(ii), G referring to gas composition), the leak diameter (2, 5 and 10 mm) and the storage pressure (5, 10, 50, 100 bar(a)).

For the closest case reported in the table compared to the present study, the reported flow rate for a methane-based fuel gas stored at 100 bar(a) and released through a 5 mm aperture is 0.4 kg/s (to be compared to 0.74 kg/s in our case), with a safe flammable extent of 4 m (to be compared to 4 to 5 m in our case).

ANNEX C - PART 3

BACKGROUND TO THE CALCULATION OF HAZARD RADII IN CHAPTER 5

C3.0 INTRODUCTION

This Annex provides extracts from *IP Calculations in support of IP15* as background to the calculation of hazard radii based on dispersion modelling. Dispersion modelling was used to determine the hazard radius, R_1 , for each release source quoted in section 5.4. The tables in this Annex use the same approach and process fluids. However, they cover a much wider range of process conditions and may therefore be used to obtain a more accurate estimate of hazard radii if required.

C3.1 BASIS FOR DISPERSION MODELLING

Dispersion modelling⁸ was carried out for representative fluids for categories A, B, C, G(i) and G(ii). The compositions used are shown in Table C7. In addition, the physical parameters used during modelling are shown in Table C8. If actual compositions of flammable fluids or dispersion parameters vary widely from those used here, specific dispersion modelling should be carried out to verify safe hazard radii.

Table C7 Fluid compositions and LFLs

Stream component (mol %)	Fluid category					LFL (vol %)	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)
	A	B	C	G(i)	G(ii)			
N ₂ Nitrogen	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	-	28,01	-196
C ₁ Methane	0,00	4,00	0,00	88,45	10,00	5,00	16,04	-161
C ₂ Ethane	0,00	0,00	0,00	4,50	3,00	3,00	30,07	-87
C ₃ Propane	70,00	6,00	1,00	3,00	3,00	2,10	44,09	-42
C ₄ Butane	30,00	7,00	1,00	100	1,00	1,80	58,12	-1
C ₅ Pentane	0,00	9,00	2,00	1,00	0,00	1,40	72,15	36
C ₆ Hexane	0,00	11,00	3,00	0,00	0,00	1,20	86,17	69
C ₇ Heptane	0,00	16,00	3,00	0,00	0,00	1,05	100,20	98
C ₈ Octane	0,00	22,00	27,00	0,00	0,00	0,95	114,23	126
C ₉ Nonane	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	0,85	128,26	151
C ₁₀ Decane	0,00	25,00	38,00	0,00	0,00	0,75	142,28	173
H ₂ O Water	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	-	18,02	100
Carbon dioxide	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-	44,01	-78
Hydrogen	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00	4,00	2,02	-253
Average MW (g/mol)	48,30	100,06	125,03	18,74	7,03			
LFL (vol %)	2,00	1,05	0,86	4,6	4,00			
LFL (kg/m ³)	0,039	0,042	0,043	0,034	0,011			

(Table 2 of *IP Calculations in support of IP15*)

⁸ Dispersion modelling was carried out using Shell Global Solutions' HGSYSTEM package, which is freely available on the internet at <http://www.hgsystem.com> to users for determining hazard radii for other conditions if required.

AREA CLASSIFICATION CODE FOR INSTALLATIONS HANDLING FLAMMABLE FLUIDS

**C3.2 HAZARD RADIUS 'LOOK-UP' TABLES
BASED ON DISPERSION MODELLING**

Hazard radii appropriate to the release hole sizes quoted for items of equipment in section 5.4 may be directly read off Tables C9(a) and (b). Where the equipment is not covered by section 5.4, hole sizes may be determined by historical data or synthesis techniques.

The numerical values given in Tables C9(a) and (b) are specific to the example fluids. The release rate for these fluids is only weakly dependent upon small variations in the storage temperature of about 20°C, which is chosen to reflect a daily average UK summer temperature. Other fluids may be more sensitive to temperature changes.

The ground effect radius, R_2 , should be used in conjunction with section 5.5 and Figure 5.6 to determine the shape of a hazardous area.

Typical hazard radii from Tables C9(a) and (b) are presented in tabular form in the relevant sections of Chapter 5.

Table C8 Physical parameters used in dispersion modelling

Standard conditions	Value
Ambient temperature	20°C
Relative humidity	70%
Wind speed	2 m/s
Reference height	10,0 m
Stability class	D
Surface roughness	0,03 m
Sample time	18,75 s
Release height	1,0 m
Reservoir temperature	20°C
Release orientation (in relation to wind direction)	0 degrees

Table C9(a) Hazard radius (R_1)

Fluid category	Release pressure (bar(a))	Release flow rate (kg/s)				Hazard radius R_1 (m)			
		Release hole diameter				Release hole diameter			
		1 mm	2 mm	5 mm	10 mm	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm
A	5*	0,01	0,04	0,3	1	2	4	8	14
	10	0,01	0,06	0,4	1,5	2,5	4	9	16
	50	0,03	0,14	0,9	3,5	2,5	5	11	20
	100	0,05	0,2	1,2	5	2,5	5	11	22
B	5	0,01	0,04	0,3	1	2	4	8	14
	10	0,02	0,07	0,4	1,7	2	4	9	16
	50	0,04	0,15	1	4	2	4	10	19
	100	0,06	0,2	1,4	5,5	2	4	10	20
C	5	0,01	0,06	0,3	1,1	2	4	8	14
	10	0,02	0,1	0,4	1,7	2,5	4,5	9	17
	50	0,04	0,2	1	4	2,5	5	11	21
	100	0,06	0,25	1,4	6	2,5	5	12	22
G(i)	5	0,001	0,002	0,02	0,06	< 1	< 1	< 1	1,5
	10	0,001	0,005	0,03	0,1	< 1	< 1	1	2
	50	0,007	0,03	0,2	0,7	< 1	1	2,5	5
	100	0,015	0,06	0,4	1,5	< 1	1,5	4	7
G(ii)	5	0,0004	0,001	0,01	0,04	< 1	< 1	1,5	3
	10	0,001	0,003	0,02	0,07	< 1	1	2	4
	50	0,004	0,02	0,1	0,4	< 1	2	4	8
	100	0,007	0,03	0,2	0,7	1	2	6	11

Figure A. 7 IP code 15, Annex C Part 3, simplified estimation of area classification extent**C 2.2 Explosion**

Several ignition points have been studied. The results reported are the explosion simulations with the most conservative location of the ignition point.

An equivalent stoichiometric cloud including 10 kg of fuel gas is defined above the expected location of the leak. This scenario was defined by WSP. A preliminary investigation by GexCon using Phast shows that this results from an approximate 8 kg/s constant flow rate corresponding to a leak diameter of somewhere between 20 – 30 mm (depending on transient properties and ventilation efficiency).

Appendix D Source terms

D 1 Transient source term for the 2 mm leak

TIME (s)	Area (m ²)	Rate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temperature (K)
50	5,00E-04	8,24E-04	2,3	275,3
53	5,00E-04	8,24E-02	234,8	275,3
55	5,00E-04	8,22E-02	234,8	275,2
60	4,98E-04	8,20E-02	234,7	275,0
65	4,97E-04	8,18E-02	234,6	274,8
70	4,95E-04	8,16E-02	234,5	274,6
75	4,94E-04	8,14E-02	234,4	274,4
80	4,93E-04	8,12E-02	234,4	274,2
85	4,91E-04	8,10E-02	234,3	274,0
90	4,90E-04	8,08E-02	234,2	273,8
95	4,88E-04	8,06E-02	234,1	273,7
100	4,87E-04	8,04E-02	234,0	273,5
105	4,86E-04	8,02E-02	234,0	273,3
110	4,84E-04	8,00E-02	233,9	273,1
115	4,83E-04	7,98E-02	233,8	272,9
120	4,82E-04	7,96E-02	233,7	272,7
125	4,80E-04	7,94E-02	233,6	272,5
130	4,79E-04	7,92E-02	233,6	272,4
135	4,78E-04	7,90E-02	233,5	272,2
140	4,76E-04	7,88E-02	233,4	272,0
145	4,75E-04	7,87E-02	233,3	271,8
150	4,74E-04	7,85E-02	233,2	271,6
155	4,72E-04	7,83E-02	233,2	271,4
160	4,71E-04	7,81E-02	233,1	271,2
165	4,70E-04	7,79E-02	233,0	271,1
170	4,68E-04	7,77E-02	232,9	270,9
175	4,67E-04	7,75E-02	232,8	270,7
180	4,66E-04	7,73E-02	232,8	270,5
185	4,64E-04	7,71E-02	232,7	270,3
190	4,63E-04	7,69E-02	232,6	270,1
195	4,62E-04	7,67E-02	232,5	269,9
200	4,60E-04	7,65E-02	232,5	269,8
205	4,59E-04	7,64E-02	232,4	269,6
210	4,58E-04	7,62E-02	232,3	269,4
215	4,56E-04	7,60E-02	232,2	269,2
220	4,55E-04	7,58E-02	232,1	269,0
225	4,54E-04	7,56E-02	232,1	268,8
230	4,53E-04	7,54E-02	232,0	268,7
235	4,51E-04	7,52E-02	231,9	268,5
240	4,50E-04	7,50E-02	231,8	268,3
245	4,49E-04	7,49E-02	231,8	268,1
250	4,48E-04	7,47E-02	231,7	267,9
255	4,46E-04	7,45E-02	231,6	267,8
260	4,45E-04	7,43E-02	231,5	267,6
265	4,44E-04	7,41E-02	231,4	267,4
270	4,43E-04	7,40E-02	231,4	267,2
275	4,41E-04	7,38E-02	231,3	267,0
280	4,40E-04	7,36E-02	231,2	266,8
285	4,39E-04	7,34E-02	231,1	266,7
290	4,38E-04	7,32E-02	231,1	266,5

TIME (s)	Area (m ²)	Rate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temperature (K)
295	4,36E-04	7,30E-02	231,0	266,3
300	4,35E-04	7,29E-02	230,9	266,1
305	4,34E-04	7,27E-02	230,8	265,9
310	4,33E-04	7,25E-02	230,7	265,8
315	4,32E-04	7,23E-02	230,7	265,6
320	4,30E-04	7,22E-02	230,6	265,4
325	4,29E-04	7,20E-02	230,5	265,2
330	4,28E-04	7,18E-02	230,4	265,0
335	4,27E-04	7,16E-02	230,4	264,9
340	4,26E-04	7,15E-02	230,3	264,7
345	4,24E-04	7,13E-02	230,2	264,5
350	4,23E-04	7,11E-02	230,1	264,3
355	4,22E-04	7,09E-02	230,1	264,2
360	4,21E-04	7,08E-02	230,0	264,0
365	4,20E-04	7,06E-02	229,9	263,8
370	4,19E-04	7,04E-02	229,8	263,6
375	4,17E-04	7,02E-02	229,7	263,4
380	4,16E-04	7,01E-02	229,7	263,3
385	4,15E-04	6,99E-02	229,6	263,1
390	4,14E-04	6,97E-02	229,5	262,9
395	4,13E-04	6,96E-02	229,4	262,7
400	4,12E-04	6,94E-02	229,4	262,6
405	4,11E-04	6,92E-02	229,3	262,4
410	4,09E-04	6,91E-02	229,2	262,2
415	4,08E-04	6,89E-02	229,1	262,0
420	4,07E-04	6,87E-02	229,1	261,9
425	4,06E-04	6,86E-02	229,0	261,7
430	4,05E-04	6,84E-02	228,9	261,5
435	4,04E-04	6,82E-02	228,8	261,3
440	4,03E-04	6,81E-02	228,8	261,2
445	4,02E-04	6,79E-02	228,7	261,0
450	4,00E-04	6,77E-02	228,6	260,8
455	3,99E-04	6,76E-02	228,5	260,6
460	3,98E-04	6,74E-02	228,5	260,5
465	3,97E-04	6,72E-02	228,4	260,3
470	3,96E-04	6,71E-02	228,3	260,1
475	3,95E-04	6,69E-02	228,2	259,9
480	3,94E-04	6,68E-02	228,2	259,8
485	3,93E-04	6,66E-02	228,1	259,6
490	3,92E-04	6,64E-02	228,0	259,4
495	3,91E-04	6,63E-02	227,9	259,2
500	3,90E-04	6,61E-02	227,9	259,1
505	3,88E-04	6,59E-02	227,8	258,9
510	3,87E-04	6,58E-02	227,7	258,7
515	3,86E-04	6,56E-02	227,6	258,6
520	3,85E-04	6,55E-02	227,6	258,4
525	3,84E-04	6,53E-02	227,5	258,2
530	3,83E-04	6,52E-02	227,4	258,0
535	3,82E-04	6,50E-02	227,3	257,9
540	3,81E-04	6,48E-02	227,3	257,7
545	3,80E-04	6,47E-02	227,2	257,5
548	3,80E-04	6,47E-04	2,3	257,5

D 2 Transient source term for the 6 mm leak

TIME (s)	Area (m ²)	Rate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temperature (K)
50	4,50E-03	7,41E-03	2,3	275,3
53	4,50E-03	7,41E-01	234,8	275,3
55	4,45E-03	7,33E-01	234,4	274,4
60	4,33E-03	7,16E-01	233,7	272,7
65	4,22E-03	7,00E-01	233,0	271,0
70	4,11E-03	6,85E-01	232,3	269,3
75	4,01E-03	6,69E-01	231,5	267,6
80	3,91E-03	6,54E-01	230,8	266,0
85	3,81E-03	6,40E-01	230,1	264,3
90	3,71E-03	6,26E-01	229,4	262,7
95	3,62E-03	6,12E-01	228,7	261,1
100	3,53E-03	5,98E-01	228,0	259,5
105	3,44E-03	5,85E-01	227,3	257,9
110	3,36E-03	5,73E-01	226,7	256,3
115	3,27E-03	5,60E-01	226,0	254,8
120	3,19E-03	5,48E-01	225,3	253,2
125	3,11E-03	5,36E-01	224,6	251,7
130	3,04E-03	5,24E-01	224,0	250,2
135	2,96E-03	5,13E-01	223,3	248,7
140	2,89E-03	5,02E-01	222,6	247,2
145	2,82E-03	4,91E-01	222,0	245,7
150	2,75E-03	4,81E-01	221,3	244,3
155	2,68E-03	4,71E-01	220,7	242,8
160	2,62E-03	4,61E-01	220,0	241,4
165	2,56E-03	4,51E-01	219,4	240,0
170	2,49E-03	4,41E-01	218,8	238,6
175	2,43E-03	4,32E-01	218,1	237,2
180	2,38E-03	4,23E-01	217,5	235,8
185	2,32E-03	4,14E-01	216,9	234,4
190	2,27E-03	4,06E-01	216,3	233,1
195	2,21E-03	3,97E-01	215,7	231,7
200	2,16E-03	3,89E-01	215,1	230,4
205	2,11E-03	3,81E-01	214,4	229,1
210	2,06E-03	3,73E-01	213,8	227,7
215	2,01E-03	3,65E-01	213,2	226,4
220	1,96E-03	3,58E-01	212,6	225,2
225	1,92E-03	3,51E-01	212,1	223,9
230	1,87E-03	3,43E-01	211,5	222,6
235	1,83E-03	3,36E-01	210,9	221,3
240	1,79E-03	3,30E-01	210,3	220,1
245	1,75E-03	3,23E-01	209,7	218,9
250	1,71E-03	3,17E-01	209,1	217,6
255	1,67E-03	3,10E-01	208,6	216,4
260	1,63E-03	3,04E-01	208,0	215,2
265	1,59E-03	2,98E-01	207,4	214,0
270	1,56E-03	2,92E-01	206,9	212,8
275	1,52E-03	2,86E-01	206,3	211,7
280	1,49E-03	2,80E-01	205,8	210,5
285	1,45E-03	2,75E-01	205,2	209,3
290	1,42E-03	2,70E-01	204,7	208,2
295	1,39E-03	2,64E-01	204,1	207,1
300	1,36E-03	2,59E-01	203,6	205,9
305	1,33E-03	2,54E-01	203,1	204,8
310	1,30E-03	2,49E-01	202,5	203,7
315	1,27E-03	2,44E-01	202,0	202,6
320	1,24E-03	2,40E-01	201,5	201,5

TIME (s)	Area (m ²)	Rate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temperature (K)
325	1,21E-03	2,35E-01	200,9	200,4
330	1,19E-03	2,30E-01	200,4	199,4
335	1,16E-03	2,26E-01	199,9	198,3
340	1,14E-03	2,22E-01	199,4	197,2
345	1,11E-03	2,17E-01	198,9	196,2
350	1,09E-03	2,13E-01	198,4	195,1
355	1,06E-03	2,09E-01	197,9	194,1
360	1,04E-03	2,05E-01	197,4	193,1
365	1,02E-03	2,01E-01	196,9	192,1
370	9,96E-04	1,98E-01	196,4	191,1
375	9,75E-04	1,94E-01	195,9	190,1
380	9,54E-04	1,90E-01	195,4	189,1
385	9,33E-04	1,87E-01	194,9	188,1
390	9,14E-04	1,83E-01	194,4	187,1
395	8,94E-04	1,80E-01	193,9	186,1
400	8,75E-04	1,76E-01	193,5	185,2
405	8,57E-04	1,73E-01	193,0	184,2
410	8,39E-04	1,70E-01	192,5	183,3
415	8,21E-04	1,67E-01	192,0	182,3
420	8,04E-04	1,64E-01	191,6	181,4
425	7,87E-04	1,61E-01	191,1	180,5
430	7,70E-04	1,58E-01	190,6	179,6
435	7,54E-04	1,55E-01	190,2	178,7
440	7,39E-04	1,52E-01	189,7	177,8
445	7,23E-04	1,49E-01	189,3	176,9
450	7,08E-04	1,47E-01	188,8	176,0
455	6,94E-04	1,44E-01	188,4	175,1
460	6,79E-04	1,41E-01	187,9	174,2
465	6,65E-04	1,39E-01	187,5	173,3
470	6,52E-04	1,36E-01	187,1	172,5
475	6,38E-04	1,34E-01	186,6	171,6
480	6,25E-04	1,32E-01	186,2	170,8
485	6,13E-04	1,29E-01	185,8	169,9
490	6,00E-04	1,27E-01	185,3	169,1
495	5,88E-04	1,25E-01	184,9	168,2
500	5,76E-04	1,23E-01	184,5	167,4
505	5,65E-04	1,20E-01	184,1	166,6
510	5,53E-04	1,18E-01	183,7	165,8
515	5,42E-04	1,16E-01	183,2	165,0
520	5,31E-04	1,14E-01	182,8	164,2
525	5,21E-04	1,12E-01	182,4	163,4
530	5,10E-04	1,10E-01	182,0	162,6
535	5,00E-04	1,08E-01	181,6	161,8
540	4,90E-04	1,06E-01	181,2	161,0
545	4,80E-04	1,05E-01	180,8	160,2
548	4,80E-04	1,05E-03	1,8	160,2

Modelling in FLACS – a brief overview

Author: Prankul Middha, GexCon Software – Updated 10 October 2009



1 Introduction

The CFD tool FLACS has been developed by Chr. Michelsen Institute (CMI), Christian Michelsen Research (CMR) and currently GexCon since 1980. FLACS is a computational fluid dynamics (CFD) code solving the compressible conservation equations on a 3-*D* Cartesian grid using a finite volume method. Most gases and liquids are Newtonian fluids, i.e. fluids that follow a simple linear relationship between shear stress and rate of shear. The basic conservation equations that govern the motion of a Newtonian fluid (one phase, both laminar and turbulent) can be represented in general as (e.g. Ertesvåg, 2000):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \Gamma_\phi \frac{\partial}{\partial x_j}(\phi) \right) = S_\phi \quad (1)$$

The conservation equations for mass, momentum, enthalpy, and mass fraction of species, closed by the ideal gas law, are included. These are given as:

1. The continuity equation (conservation of mass):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

2. The Navier-Stokes equations (conservation of momentum):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (3)$$

where

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_B - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

is the stress tensor for a Newtonian fluid, μ is the dynamic molecular viscosity, μ_B is the bulk viscosity and f_i is the acceleration due to an external body force.

3. For mixtures consisting of N different substances, an equation for the mass fractions Y_k of $(N-1)$ substances (the N^{th} mass fraction is given by $\sum_k Y_k = 1$):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho Y_k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + R_k \quad (5)$$

where D is the diffusion coefficient (assumed to be same for all substances) and R_k is a source term (e.g. due to chemical reactions).

4. The energy equation is similar in form to the species conservation equation and is given as:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \alpha \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (6)$$

where h is the specific enthalpy (the internal energy e or temperature T can be used instead), α is the thermal diffusivity, and S_h is a source term (e.g. due to chemical reactions).

5. An equation of state (e.g. ideal gas law):

$$PV = RT \quad (7)$$

6. A calorific equation of state:

$$h = C_p T \quad (8)$$

In the above two equations, P is the pressure, V is the specific volume, R is the gas constant, and C_p is the specific heat capacity (at constant pressure). Turbulence must be modelled in addition. This is described below.

The in-house development started around 1980, primarily aimed at simulating the dispersion of flammable gas in process areas, and subsequent explosions of gas-air mixtures. Hjertager (1985, 1986) describes the basic equations used in the FLACS model, and Hjertager, Bjørkhaug & Fuhre (1988a,b) present the results of explosion experiments to develop and validate FLACS initially. During the course of more than 25 years of

development and evaluation of the FLACS software, the numerical methods have been steadily modified and revised.

The inherent capability of FLACS has been performing explosion and dispersion calculations to help in the improvement of oil and gas platform safety with initial focus on the North Sea. Significant experimental validation activity has contributed to the wide acceptance of FLACS as a reliable tool for prediction of natural gas explosions in real process areas offshore and onshore.

2 Numerical schemes

The numerical model uses a second order central differencing scheme for resolving diffusive fluxes and a second-order “kappa” scheme (hybrid scheme with weighting between 2nd order upwind and 2nd order central difference, with delimiters for some equations) to resolve the convective fluxes. The solver is implicit in nature. The time stepping scheme used in FLACS is a first order backward Euler scheme. Second order schemes in time have been implemented, but are generally not used due to short time steps. Based on extensive validation, guidelines for time stepping have been established in order to get accurate results. These are based on CFL (Courant-Friedrich-Levy) numbers based on speed of sound (CFLC) and flow velocity (CFLV). The time step length (based on CFLC) is determined by:

$$\Delta t = \frac{CFLC \times \Delta}{c} \quad (9)$$

When CFLV is used, this involves comparison of the ratio between the grid cell size and the flow velocity in all directions. The most stringent criterion for the size of the time step is always chosen. For explosion calculations CFLC = 5 and CFLV = 0.5 must be applied (which means that the pressure (sound) can propagate 5 cells and the flow 0.5 cells in each time step) to achieve good results. For dispersion calculations, the guidelines are less strict as the results do not depend much on the time steps. Normally it is recommended to increase the time steps by a factor of 4 (CFLC = 20 and CFLV = 2). When grid is refined near leak, it is also recommended to ignore the refined region (i.e. multiply CFLC-number with the refinement factor).

The discretized equations are solved using the BiCGStab in the SIMPLE pressure correction algorithm (Patankar, 1980). The SIMPLE algorithm has been extended to handle compressible flows with additional source terms for the compression work in the enthalpy equation. Iterations are repeated until a mass residual of less than 10^{-4} is obtained.

3 Turbulence model

FLACS uses a standard k - ϵ model in order to model the convection, diffusion, production, and dissipation of turbulence (see, e.g. Harlow & Nakayama, 1967; Launder & Spalding, 1974). This model includes the conservation equation for turbulent kinetic energy (k) given as:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon \quad (10)$$

and the equation for dissipation (ϵ) of turbulent kinetic energy given as:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (11)$$

The effective viscosity μ_{eff} is the sum of the laminar and turbulent viscosities. The turbulent viscosity μ_t is modelled by the Boussinesq eddy viscosity model as:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

The constants $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, C_μ , σ_k , and σ_ϵ are based on the standard k - ϵ model (Launder and Spalding, 1974). The turbulence intensity and the length scale are estimated as:

$$u' = \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2} \quad (13)$$

and

$$l_I = C_I \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (14)$$

respectively, where C_I is 0.022 (Abdel-Gayed & Bradley, 1981).

To achieve independent and rapid build-up of the turbulent flow field and representative turbulence production from objects not resolved by the computational grid (subgrid objects), the standard k - ε turbulence model is modified by adding source terms for turbulence production by velocity gradients. In addition, several other modifications are implemented, for instance (Arntzen, 1998):

- For objects with width equal to about one control volume (CV), typical numerical schemes will estimate zero turbulence production, as the du/dy terms behind the objects will be identical and opposite and will cancel. This situation has been improved by a modification of the discretization for production of turbulent energy.
- Wall functions with no slip condition are implemented for solid surfaces. Analytical models estimate the total production of turbulent energy across the boundary layer, and add production terms to the relevant CVs across the boundary layer, even if the first grid cell is larger than the boundary layer.
- Source terms for the production of turbulent energy due to Rayleigh–Taylor instabilities (when buoyant gas is accelerating denser gas due to gravity) have been included.

Despite the known limitations of the k - ε model, it is a powerful model for industrial applications. With the close coupling between sub-grid modelling and turbulence model, it is not believed that replacing k - ε model with a more advanced turbulence model with more equations and constants will give much added value for the typical simulations carried out with FLACS.

4 Combustion models

FLACS contains a combustion model that assumes that the flame in an explosion can be regarded as a collection of flamelets. The ignition process is modelled by artificially forcing the initial chemical reactions in a small volume at the beginning of the calculation. One-step reaction kinetics is assumed, with the laminar burning velocity being a measure of the reactivity of a given mixture. A chemical equilibrium model is used to estimate the composition of the combustion products. These include H_2O and CO_2 , but also increasing amounts of H_2 , CO and OH for rich concentrations and high temperatures. Heat is added

due to combustion and the heat capacities for different gases depend strongly on temperature. The model consists of two parts: a three-step burning velocity model and a flame model. To represent flame folding around subgrid obstacles, a flame folding model has also been implemented.

Since a grid size that is significantly finer than realistically possible is needed to fully resolve the flame, it is common in numerical methods to artificially thicken the flame so that its structure is fully resolved and coarse grids may be used. This method is used in the β flame model in FLACS (Butler and O'Rourke, 1976). The flame thickness is increased by a factor β by increasing the thermal diffusivity (and hence flame speed) by the same factor. The reaction rate is reduced by a factor $1/\beta$ in order to compensate for the increase in flame speed. The factor β used in FLACS is proportional to the grid size and inversely proportional to the integral length scale (Arntzen, 1998). The flame model gives the flame a constant flame thickness (equal to 3–5 grid cells) and assures that the flame propagates into the reactant with the specified velocity that is based on a series of parameters. The flame is propagated based on the transport of “products” into new cells and subsequently “burns” with a specified velocity as indicated above. A number of correction models are made to compensate for weaknesses due to flame thickness, e.g.

- Initial stages must be estimated (before 3 control volume flame thickness is reached)
- Correction for flames with high curvature
- Combustion towards walls
- Flame folding behind subgrid objects

These models ensure good results for a range of grid resolutions. The real flame area is properly described. For a finite thickness of the reaction zone (3–5 grid cells), the flame area needs to be corrected for curvature at these scales and smaller. All flame wrinkling at scales less than the grid size must be represented by sub-grid models (and this is important for flame interaction with objects of the grid size or less). Models for laminar and quasi-laminar burning velocities implemented in the FLACS code, depending on among others the Lewis number, are described in detail in Arntzen (1998).

The burning velocity model consists of the following three models:

(a) A laminar burning velocity model that describes the laminar burning velocity as a function of gas mixture, concentration, temperature, pressure, oxygen concentration in air and amount of inert diluents (If more than one gas has been defined, curves are interpolated to obtain the correct relation for the actual mixture)

(b) A model describing quasi-laminar combustion in the first phases of flame propagation after ignition. Due to flame instabilities e.g. Rayleigh-Taylor and thermal-diffusive instabilities and body forces, the observed burning velocity increases as the flame propagates away from ignition (due to flame wrinkling). This is mathematically represented as:

$$S_{QL} = S_L \sqrt{1 + C_{QL} R_F} \quad (15)$$

All flame wrinkling at scales less than the grid size is represented by sub-grid models, which is important for flame interaction with objects smaller than the grid size

(c) A model that describes turbulent burning velocity as a function of turbulence parameters (intensity and length scale). The model is based on a broad range of experimental data (Abdel-Gayed, Bradley & Lawes, 1987). Bray (1990) found that the data from Abdel-Gayed et al. could be represented in a reasonable manner by the following empirical expression:

$$\frac{S_T}{S_L} = 0.875 K^{-0.392} \frac{u'}{S_L} \quad (16)$$

Here, K is the Karlovitz stretch factor, S_T is the turbulent burning velocity, and S_L is the laminar burning velocity. By introducing the definition for the Karlovitz stretch factor, in terms of the turbulent Reynolds number ($Re_T = u' l_t / \nu$, where ν is the kinematic viscosity), this can be reformulated to obtain a general correlation for the turbulent burning velocity:

$$\begin{aligned} S_T &= 0.875 \left\{ 0.1573 \left(\frac{u'}{S_L} \right)^2 \left(\frac{u' l_t}{\nu} \right)^{-0.5} \right\}^{-0.392} u' \\ &= 1.81 u'^{0.412} S_L^{0.784} l_t^{0.196} \nu^{-0.196} \end{aligned} \quad (17)$$

This is the default correlation for turbulent burning velocity that is used in FLACS. However, the length scale used here is not directly obtained from the turbulence model, but is rather a function of the geometry and flame travel distance. With very strong

turbulence compared to length scale, a relation limiting the reaction rate (Karlowitz “quench” criterion) is also implemented. Models for the effect of water deluge also exist.

The flame structure depends among others on the Lewis number (Le). The Lewis number is a dimensionless quantity defined as the thermal diffusivity divided by the mass diffusion coefficient, and is used in studies involving the combined effect of both heat and mass transfer. Therefore, the effect of Lewis number for hydrogen-air mixtures is also included.

5 Geometry representation – porosity concept and sub-grid models

A good description of geometry and the coupling of geometry to the flow, turbulence, and flame is one of the key elements in the modelling. Since even small details of the obstacles on a petrochemical installation can have a significant impact on flame acceleration and hence explosion overpressures, the proper representation of the obstacles has been a key aspect of the development of the FLACS code (Bjerketvedt, Bakke & van Wingerden, 1997). The FLACS code uses a “distributed porosity concept” which enables the detailed representation of complex geometries (in some cases with up to 400.000 objects) using a Cartesian grid (as shown in Figure 1).

Large objects and walls are represented on-grid, and smaller objects are represented sub-grid. This enables geometrical details to be characterized while maintaining reasonable simulation times. This approach represents geometrical details as porosities (opposite of blockage) for each control volume. Obstacles such as structures and pipes are represented as area porosities (the opposite of blockages) on control volume (CV) faces, and are represented as volume porosities in the interior of the CV. Each CV surface or each CV volume is fully open, fully blocked or partly blocked. For the partly blocked surfaces or volumes, the porosity is defined as the fraction of the area/volume that is available for fluid flow.

The porosity concept models the blockage, drag formulation, sub-grid turbulence generation and flame folding coefficients to obtain good simulation results despite coarse grid resolutions. Sub-grid objects contribute to flow resistance, turbulence generation and flame folding in the simulation as it is important to model the turbulence correctly for

partly porous and “sub-grid” objects to obtain good results. In case of small objects, the flow kinetic energy lost due to drag is compensated as a source term for turbulent energy. The flame folding contribution is very important for explosion calculations. The geometry representation has been optimized so that the dependency on grid size, shape, and translation is as low as possible. Hjertager (1985, 1986) and Arntzen (1998) describe this concept in more detail.

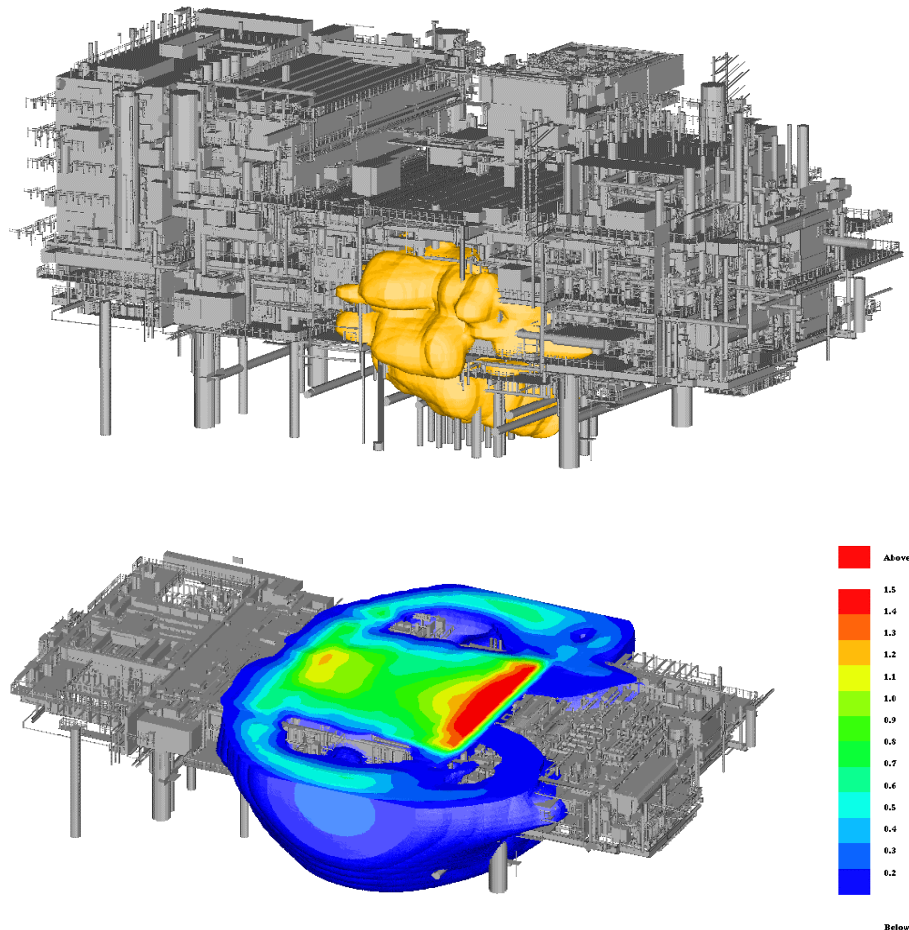


Figure 1 – Representation of the detailed geometry is important for the quality of the predictions for explosion and dispersion studies. In FLACS this is handled with a porosity concept.

References

- Abdel-Gayed, R. G. & Bradley, D. (1981). A two-eddy theory of premixed turbulent flame propagation. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 301, 1–25.
- Abdel-Gayed, R.G., Bradley, D. & Lawes, M. (1987). Turbulent burning velocities: a general correlation in terms of straining rates, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 414, 389–413.
- Arntzen, B.A. (1998). Modelling of turbulence and combustion for simulation of gas explosions in complex geometries, PhD Thesis, NTNU, Trondheim, Norway, ISBN 82-471-0358-3.
- Bray, K.N.C. (1990). Studies of the turbulent burning velocity, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 431, 315–335.
- Ertesvåg, I.S., (2000). Turbulent Strøyming og Forbrenning (in Norwegian), Tapir akademisk forlag, Trondheim, Norway, ISBN 82-519-1568-6.
- Harlow, F.H. & Nakayama, P.I. (1967). Turbulence Transport Equations. *Phys. Fluids*, 10, 2323–2332.
- Hjertager, B.H. (1985). Computer simulation of turbulent reactive gas dynamics. *J. Model. Identification Control*, 5, 211–236.
- Hjertager, B.H. (1986). Three-dimensional modeling of flow, heat transfer, and combustion. *Handbook of Heat and Mass Transfer*. Gulf Publishing Company, P.O. Box 2608, Houston, Texas 770011, pp. 304–350 Chapter 41.
- Hjertager, B.H., Bjørkhaug, M., & Fuhre, K.. (1988a). Gas explosion experiments in 1:33 scale and 1:5 scale; offshore separator and compressor modules using stoichiometric homogeneous fuel–air clouds. *J. Loss. Prev. Process Ind.* 1, 197–205.
- Hjertager, B.H., Bjørkhaug, M. & Fuhre, K. (1988b). Explosion propagation of non-homogeneous methane-air clouds inside an obstructed 50 m³ vented vessel. *J. Haz. Mater.* 19, 139–153.
- Launder, B.E. & Spalding, D.P. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 3(2), 269–289.
- Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Pub, ISBN: 0070487405.



Summary of FLACS validation

Author: Prankul Middha, GexCon Software – Updated 12th July 2012

Introduction

Validation against a large set of experimental data is important for any CFD tool. This is partly explained by the analyst's paradox "Everyone believes an experiment except the experimentalist. No one believes an analysis except the analyst" and the modeller's paradox "Making a model is easy, making it fit reality is hard". For the case of the modelling within FLACS, especially for explosion simulations, the physics modelled (flame models, pressure waves, turbulence, small-scale equipment, etc.) is of much smaller scale than realistic grid cells. Therefore, a significant amount of sub-grid modelling will be required. For some models, engineering is needed to make them grid and time step independent. Hence, extensive VERIFICATION and VALIDATION of models is essential. Further, FLACS calculations are often used to make "expensive" decisions about design of petrochemical facilities and it is very important to have inherent trust in the results that are obtained.

Explosion validation

In general, deflagration calculations are challenging due to the strong feedback loop with flames generating expansion flow, which produce turbulence, which accelerates the flame again (Schelkin mechanism). Small errors in the representation of geometry, flame area or other parameters can lead to significant errors in flame speed and consequence predictions. Therefore validation against a widest possible array of experiments is important. FLACS validation efforts in the 1990s focused on natural gas and some other hydrocarbons. A lot of validation for hydrogen explosions has been carried out in the 2000s. As a part of the recent JIP, "FLACS 2011 and beyond", several other validation studies have been performed.

Natural Gas (and Hydrocarbons)

For natural gas (and in several cases propane, ethylene, etc.) deflagration calculations, several hundred experiments were simulated as part of validation exercises in the 1990s (Hansen, Storvik & van Wingerden, 1999). This extensive set of experiments evaluated the effects of congestion (i.e., obstacle density) in simple symmetric and more complex geometries, along with various confinement levels (with or without walls). The experiments also considered: geometries that were completely filled with flammable gas versus ones that were only partially filled; blast effects due to varying the ignition location; and the effect of water sprays (deluge) on the consequences of explosions. A subset is shown in Figure -3. Some of the significant efforts in the 1990s include:

- British Gas (Advantica) 180 m³ box (Catlin, Gregory, Johnson & Walker, 1993): Five congestion levels, different vent sizes, geometries, dry or with water deluge (nozzles/pressure), different gas concentrations and more (almost 100 experiments). Simulations reported in Hansen and Åsheim (1995).
- CMR (GexCon) 3D-corner (27 m³), 3D pipe arrays, methane/propane, almost 10 geometries with volume blockage ratio from 0.1–0.5. Simulations reported in Hansen and Åsheim (1995).
- CMR (GexCon) M24 module (50 m³) (Hjertager, Bjørkhaug & Fuhre, 1988a; 1988b): variation in congestion, vent configuration, gas type and concentration, ignition location, deluge, non-homogenous clouds, pre-ignition turbulence and more (100s of tests). Simulations reported in Hansen and Åsheim (1995). Some newer simulations done in connection with the inhibitor project from Total are reported in Middha et al. (2011).
- Shell SOLVEX chambers (2.5 m³, 550 m³), four congestion levels, methane, propane, ethylene (small scale only). Simulations reported in Hansen and Åsheim (1995).
- MERGE (TNO and British Gas) (Mercx, 1996): Two scales (46 and 250 m³), 3D pipe arrays, three scales, volume blockage ratios from 0.05–0.20, different gases and mixtures, tests with pre-ignition turbulence. Simulations reported in Hansen and Åsheim (1995). Newer simulations are reported in Hansen et al. (2010) and the report from the JIP project “FLACS 2011 and beyond”
- British Gas (Advantica) BFETS (Selby & Burgan, 1998)/ HSE Phase 3A (Al-Hassan & Johnson, 1998)/ Phase 3B full-scale tests (1600–2700 m³) (Johnson, Cleaver, Puttock & van Wingerden, 2002), congestion level, ignition location, water deluge, gas concentration, vent area, realistic releases and more (almost 100 full-scale tests). Simulations reported in Foisselon, Hansen & van Wingerden (1998).

Grid independency studies as well as more basic validation studies (shock-tube, transport of passive scalar, turbulence generation behind object with different grids, etc.) are important parts of a validation study. Similar studies are carried out to ensure good performance of FLACS in other areas, for instance far-field blast propagation from deflagrations, which is relevant e.g. for control room location studies for onshore plants (van Wingerden, Hansen & Teigland, 1995; van Wingerden, Hansen & Foisselon, 1999, Hansen et al. 2010).

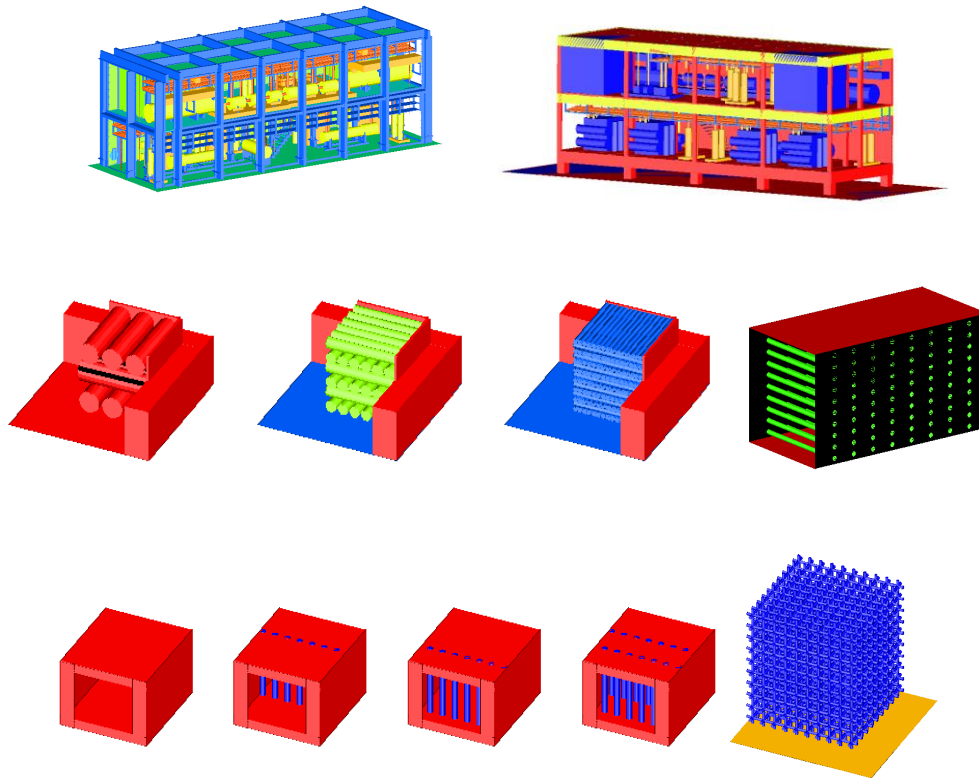


Figure 1 – Test geometries applied in natural gas explosion validation of FLACS. From the top left Advantica full-scale rig, GexCon offshore module, 3 GexCon 3D-corner geometries, Advantica Bang-box, 4 Shell SOLVEX geometries and Advantica MERGE geometry.

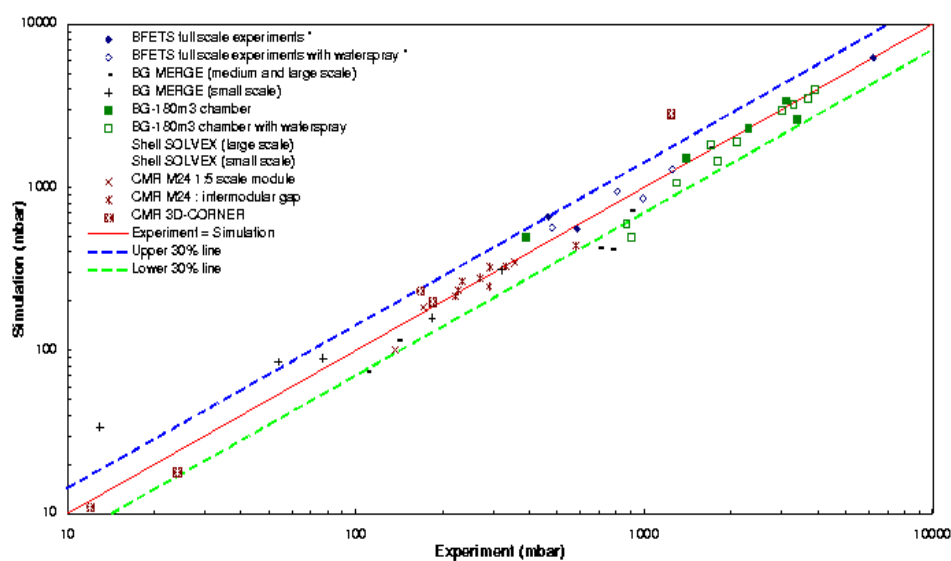


Figure 2 – Validation of FLACS for deflagrations showing some of the comparisons between simulations and experiments performed for deflagrations for natural gas (1997).

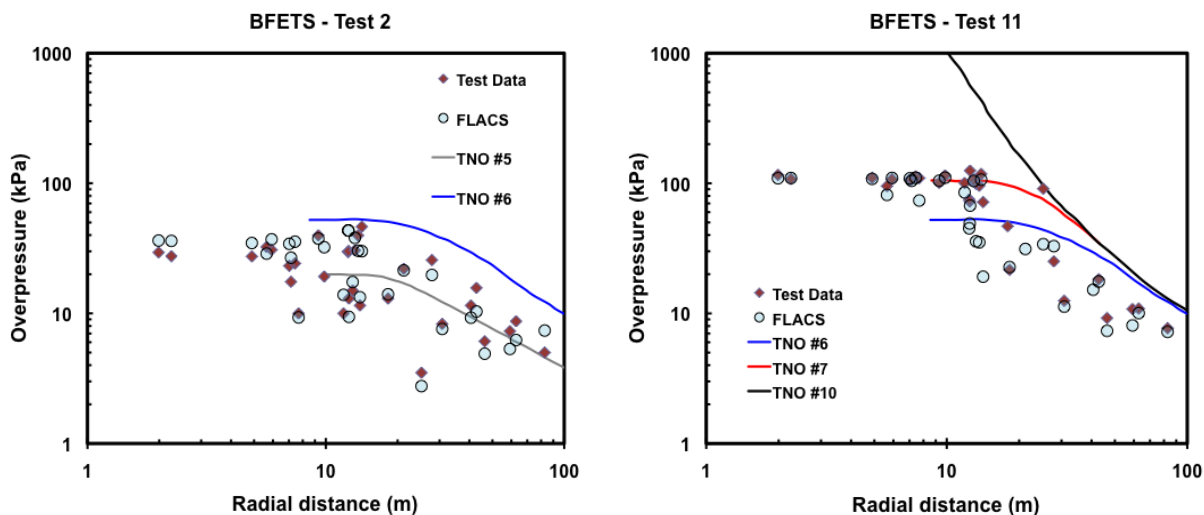


Figure 3 – Sample BFETS simulations (circles) compared to experiments (diamonds) and blast curves from TNO Multi energy method (Hansen et al. 2010). Low congestion density and end ignition (lower left plot), high congestion density and end ignition with deluge nozzles 17 litre/m²/min (lower right plot).

Other validation studies (for hydrocarbons) carried out in the past 5-7 years are summarized below (more details for most of them are available in the reports for the JIP project “FLACS 2011 and beyond”):

- Zipf, Sapko & Brune (2007): 6 tunnel tests with up to 150 and 220 m³ gas cloud sizes, different tunnel designs. Simulations reported in the same report.
- Lind and Whitson (1977): Hemispherical balloons, 10 and 20 m diameter; Several fuels (Methane, propane, ethylene, acetylene, ethylene oxide)
- Brossard, et al. (1985): Balloon and tent experiments, 12 and 125 m³; Ethylene and acetylene
- GexCon “tent” experiments (van Wingerden, et al., 1994): “Laminar” combustion tests in a 62.5 m³ tent; Methane, ethane, propane and mixtures of these
- FM Global experiments (Bauwens, et al., 2010; Chao et al., 2011; Bauwens et al., 2011): 64 m³ vented chamber (with and without obstructions), different ignition locations, methane, propane and hydrogen. Simulations also described in Pedersen & Middha (2012).
- BG/Advantica/GLND 45 m enclosure (Harris & Wickens, 1989; Cronin and Wickens, 1986; 1988): 45-m long tent with pipework; natural gas, propane, ethylene and cyclohexane (however limited success, problem to maintain 500-1000 m/s flame speed in unconfined pipe racks)
- RIGOS experiments (van den Berg & Mos, 2005): Analysis of critical safety gap in two obstructed geometries (MERGE type); Methane and ethylene (challenges seen, too high

explosion pressures in 2nd unit in many cases with significant separation distance, explanation likely partly due to experimental issues and partly modelling)

- Raufoss experiments (Hjertager et al., 1982; 1983; 1984): 2.5 m diameter, 10 m long pipe with orifices (Raufoss) (many configurations; homogeneous & non-homogeneous); methane and propane
- Park et al. (2008): Small-scale experiments on the effect of multiple obstacles in vented explosion chambers, Methane (problems with normal FLACS are seen, partly turbulence model issues “1cm bug”)
- Pritchard et al. (1996): Small-scale experiments in a Channel (1.2 m long, 0.3 × 0.3 m cross-section) with different baffle configurations; Methane and propane
- Mackay et al. (1989): DRES large-scale tube experiments (Acetylene, Ethylene, Propane & Vinyl chloride), the experimental configuration consisted of a 0.9 m diameter steel tube, 7.8 m in length. One end of the tube was open to a cylindrical plastic bag 1.8 m or 2.4 m in diameter and approximately 8 m in length.
- British Gas (Midlands Research Station, 1985): Vented explosions in a twin compartment vessel. Investigation of the interactions between two chambers connected by a doorway (open or closed). Described in Skippon (1985) (Confidential report) and Pedersen et al. (2012).
- Shell 30 m³ vented chamber (several config.). Experiments described in Harrison & Eyre (1987).

Hydrogen

In addition, significant validation work for explosion studies for scenarios relevant to hydrogen safety has been carried out from 2001-2010 where results obtained with FLACS have been compared with results from 100s of experiments. This includes tests in tunnels, channels, unconfined geometries (balloons, refuelling station), highly congested rigs, smooth and obstructed geometries, vented geometries, jet ignition scenarios, and more. A summary is given below (several of the simulations are reported in Middha (2010) but other sources are also provided in most cases).

- GexCon 3D-corner tests (Renoult & Wilkins, 2003): Small-scale obstacle array of 37 cm × 37 cm × 37 cm) with 3 different obstruction densities. Two ignition positions and 3–6 gas concentrations were applied. Simulations reported partially in Hansen et al. (2005ab) and other internal GexCon reports of the 2001-04 hydrogen safety project.
- GexCon channel (1.4 m × 0.30 m × 0.30 m) experiments with 4 different baffle configurations, 2 ignition locations and 3–6 gas mixtures with air (Renoult & Wilkins, 2003). Simulations reported partially in Hansen et al. (2005ab); Middha & Hansen (2009) and other internal GexCon reports of the 2001-04 hydrogen safety project.

- Balloon experiment (2094 m^3) with stoichiometric hydrogen mixture, ignited at centre, pressure dynamics recorded at 11 transducers installed on the ground level (Schneider & Pfortner, 1983; Becker & Ebert, 1985). Simulations reported in García et al. (2010).
- About 30 experiments in the Sandia FLAME facility (Sherman, Tieszen & Benedick, 1985), geometry is a $30.5 \text{ m} \times 1.83 \text{ m} \times 2.44 \text{ m}$ channel with closed or partly open ceiling (13 % or 50 %), and varying congestion (with or without baffles blocking 33 % of the channel cross-section). Tests were performed with H_2 concentrations from 7–30 %. Simulations reported in Hansen et al. (2005a).
- 5 experiments in a vented tube (different venting ratios from 0-100 %), diameter 17.4 cm, 12.2 m long, repeated baffles every 17.4 cm (blockage ratio 0.6), 13 % hydrogen-air mixture (HYCOM project). Simulations reported in Middha & Hansen (2009).
- 8 experiments in a confined rectangular tube (cross section $38 \text{ cm} \times 38 \text{ cm}$, length 9.9 m), with varying concentration (20, 30, 57 %), varying BR (0.32, 0.47, 0.65) and number of obstacles (0, 7, 13, 25). Experimental details in (Groethe, Colton & Chiba, 2002). Simulations reported in Middha et al. (2007a); Middha & Hansen (2009).
- Explosion tests in a representative hydrogen refuelling station (70 m^3 cloud) with two dispensers and one vehicle placed in front of a high wall (Figure 4), stoichiometric hydrogen-air mixture (Shirvill & Roberts, 2006; Shirvill, Royle & Roberts, 2007). Simulations reported in Makarov et al. (2009); Middha & Hansen (2009).
- 16 explosion experiments in a highly congested repeated pipe grid (Figure 4) with dimensions $3 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$ (8 different concentrations ranging from $\text{ER} = 0.8\text{--}1.7$, 2 different concentration levels). Experiments were also carried out with ethylene (Royle, Shirvill & Roberts, 2007). Simulations reported in Middha (2010).
- Several different experiments (different hydrogen concentrations) involving hydrogen explosions in a tunnel with and without vehicles (Groethe, Merilo, Colton, et al., 2007). The experimental set-up consisted of a 78.5 m long tunnel with a diameter of 2.4 m and a cross-sectional area of 3.74 m^2 (one-fifth scale mock-up of a typical tunnel for road transport). The explosive hydrogen-air mixture was located in a 10 m region filling a volume equal to 37 m^3 . Simulations reported in Baraldi et al. (2009).
- 11 different experiments with varying initial pressure (0.2–8 bar) in a smooth tube (Kuznetsov, et al., 2005) closed at both ends (105 mm diameter, 24 m long), stoichiometric hydrogen-air mixture. Simulations reported in Middha, Hansen & Storvik (2006).
- 3 different experiments in a 18 m long tube closed at both ends (diameter 5, 15, 30 cm) filled with obstacles (blockage ratio about 40 %), stoichiometric hydrogen-air mixture (Peraldi, et al.,

1986). Experiments were also carried out for propane. Simulations described in Middha, Hansen & Storvik (2006) and Middha & Hansen (2008).

- 4 experiments in a vented chamber with jet ignition (KOPER facility) described in Dorofeev, Bezmelnitsin, & Sidorov, 1995. Stoichiometric hydrogen-air mixture, different jet orifice diameters and cloud sizes. Simulations described in Middha, Hansen & Storvik (2006).
- 5 experiments in a lane-geometry (12 x 3 x 3 m) with jet ignition from a driver chamber (3 x 1.5 x 1.5 m) filled with about 20 % hydrogen-air mixture, different opening diameters in front wall of driver chamber with some geometry in the lane (Pfortner & Schneider, 1984). Simulations described in Middha, Hansen and Middha & Hansen (2008).
- Other explosion validation carried out by Sandia/SRI (see below in dispersion section)

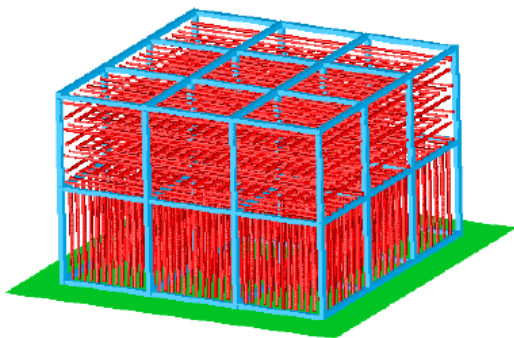


Figure 4 – Examples of geometries used for hydrogen explosion validation: (left) highly congested repeated pipe grid and (right) Mock hydrogen refueling station.

Ventilation and Dispersion validation (including combined dispersion & explosion tests)

The validation of ventilation is usually closely connected to the validation of gas dispersion, as it may be more accurate to study the concentration of gases in a flow to evaluate ventilation pattern than to perform local wind measurements. Nonetheless, through the 1990s, several ventilation validation studies were performed on real offshore oil installations. This included studies at Oseberg-C (Norsk Hydro), Beryl-B (Mobil) and Nelson (Enterprise Oil) platforms in cooperation with platform operators. At the Nelson platform GexCon performed onsite wind measurements for all major platform areas for a range of different wind conditions, and compared these to simulations. The results were generally good, and it was confirmed that FLACS using the porosity concept gives a much better representation of the flow field than a general purpose CFD-tool ignoring the finer geometry details. GexCon has also performed a number of experiments with forced ventilation from a funnel (Hansen, et al., 1998) in which ventilation/gas concentration in our test rig was evaluated. There has also been some validation as a part of the NYC urban

dispersion project (Hanna, et al., 2006). In addition, some work is being carried out as a part of the NORCOWE wind-energy project.

There have also been several validation studies for both light and heavy gas dispersion as well as liquid spills and spread in order to test the performance of FLACS. Experiments have included subsonic (low momentum) and sonic (high momentum) releases and both free jets and impinging releases. The dispersion validation is detailed below:

Natural gas

- Dispersion of flammable gas and ignition of non-homogeneous gas cloud (GexCon experiments and large scale experiments as a part of the Phase3B project), which is highly relevant for QRA-studies performed towards offshore oil & gas industry and elsewhere (Hansen, Renoult & Bakke, 2001; Johnson, et al., 2002; Hansen, et al., 2011).
- Basic validation studies of natural gas jets (free jets along the wind, free jets in cross-wind) have also been carried out as a part of the Gas Safety Programs in the 1990s.

Hydrogen

Extensive validation studies have been carried out for hydrogen releases (subsonic and sonic gaseous releases as well as liquid releases) in the past decade. Most of the simulations carried out by GexCon are described in Middha (2010) but additional references for simulations are also given below, if available (if no reference is given, please check Middha (2010)).

Subsonic releases

- INERIS gallery facility (Lacome et al., 2007): 1 g/s release for 240 s through a 2 cm orifice on top of a release chamber with a 5160 s dispersion time thereafter in an almost-closed room shaped as a rectangular box (volume 78.4 m³). Simulations reported in Venetsanos et al. (2009); Middha, Hansen & Storvik (2009).
- CEA garage facility (Gupta et al., 2007): Similar experiment to INERIS, but with helium. 1-10 litre/s release in a 40 m³ “almost-closed” room. Simulations reported in Middha, Hansen & Storvik (2009).
- GexCon small-scale chamber (Hansen, Storvik, & Renoult, 2005): Hydrogen release flow rate 1.15 NLs⁻¹ in a small rectangular vessel, divided into compartments by use of four baffle plates with a vent opening at the wall opposite the release location. Simulations reported in Hansen, Storvik, & Renoult (2005); Middha, Hansen & Storvik (2009).
- University of Florida Hallway experiments (Swain, Grillot & Swain, 1998): ca. 0.95 litre/s release in a hallway with dimensions 2.9 m × 0.74 m × 1.22 m with a roof vent and a lower door vent, 20 minutes leak duration, 0.045 m² leak area, bottom of hallway

- University of Florida garage experiments (Swain, Grilliot & Swain, 1998): He release in garage (volume ca. 67 m^3) with full-scale model vehicle, 2 litre/s, 2 h release, 0.02 m^2 leak area, leak location at bottom of vehicle, 3 different vent sizes in front wall (6, 24 and 50 cm height).
- University of Florida Ignitability experiments (Swain, Filoso, & Swain, 2007): horizontal leaks through a wall (ca. 9.5 litre/s) at two different momentums (Mach number = 0.1 and 0.2). Simulations reported in Middha, Hansen & Storvik (2009).

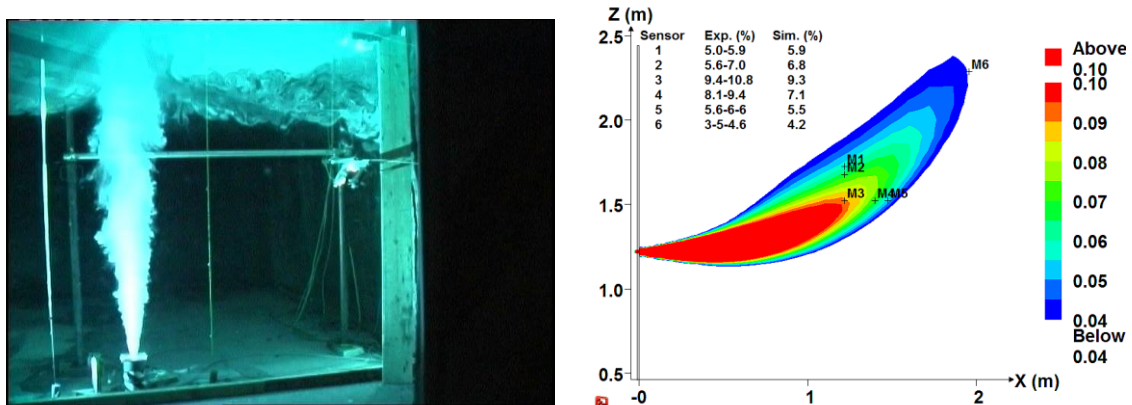


Figure 5 – Examples of subsonic release studies (hydrogen)

Subsonic impinging releases (combined release and explosion experiments)

- FZK experiments (Friedrich, et al., 2007): 9 different vertical leaks (varying nozzle size, release rate, and momentum) impinging on a plate in two configurations: (1) Square horizontal plate (dimension 1.0 m) at a distance of 1.5 m above the release nozzle, and (2) Same set-up as configuration 1 but with four additional vertical sidewalls of 0.50 m height, forming a downward open hood with a volume of 0.5 m^3 . The resulting gas cloud was ignited and overpressures were recorded at various different locations. Simulations (both dispersion and explosion) reported in Middha, Hansen, Grune & Kotchourko (2010).
- Sandia/SRI experiments in tunnels (Houf, et al., 2012a): Combined experimental and modeling study involving releases from three tanks (each holding 1.67 kg) through TPRD vents from a hydrogen fuel-cell vehicle (FCV) inside a tunnel. Experiments carried out in a scaled tunnel facility (ca. 1/6.3 based on area) at SRI Corral Hollow site. Simulations also carried out by Sandia and reported in Houf, et al. (2012a).
- Sandia/SRI experiments on forklifts in enclosed spaces (Houf et al., 2012): Experiments involving release from a hydrogen tank from a hydrogen fuel-cell forklift inside warehouses. CFD simulations (FLACS/Fuego) have been used to model the release and dispersion of gaseous hydrogen from the vehicle and to study the behavior of the ignitable hydrogen cloud inside the warehouse or enclosure. The overpressure arising as a result of ignition and subsequent deflagration of the hydrogen cloud within the warehouse has been studied for different ignition delay times and ignition locations. Both ventilated and unventilated warehouses have

been considered in the analysis. Simulations also carried out by Sandia and reported in Houf, et al. (2012b).

- Sandia/SRI experiments on use of barrier walls for mitigation (Houf, et al., 2011; Schefer, et al., 2011): An experimental and modeling program has been performed at Sandia National Laboratories to better characterize the effectiveness of barrier walls to reduce hazards. This paper describes the experimental and modeling program and presents results obtained for various barrier configurations. Measurements of the ignition overpressure, wall deflection, radiative heat flux, and wall and gas temperature were also made at strategic locations. The modeling effort includes three-dimensional calculations of jet flame deflection by the barriers, computations of the thermal radiation field around barriers, predicted overpressure from ignition (FLACS), and the computation of the concentration field from deflected unignited hydrogen releases.

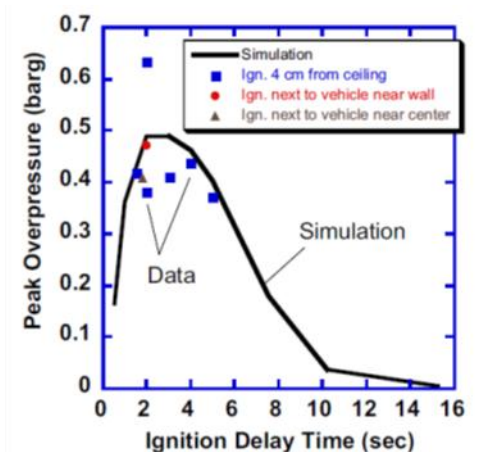


Figure 6 – Tunnel release and explosion experiments at Sandia/SRI

Sonic releases

- HSL experiments (Shirvill, et al., 2006): Horizontal free jet, 100 bar release pressure, 3 mm nozzle size. Simulations reported in Middha, Hansen & Storvik (2009).
- FZK experiments (Friedrich, et al., 2007): Horizontal free jet, 20–260 bar release pressure, 0.25 mm nozzle. Simulations reported in Middha, Hansen & Storvik (2009).
- INERIS experiments (Chaineaux, 1999): Horizontal free jet, 200 bar release pressure, 0.5 mm nozzle size.

Liquid hydrogen releases

- BAM experiments (Statharas, et al., 2000): LH₂ release between two buildings, estimated release rate of 0.37 g/s that lasted for 125 s. Neutral stability class, estimated average wind speed 0.5 m/s. Simulations reported in Middha, Ichard, Hansen & Arntzen (2011).

- NASA experiments(Witcofski & Chirivella, 1984; Witcofski, 1981): Large-scale releases aiming to investigate the generation and dispersion of flammable clouds that could be formed as a result of large, rapid spills of LH₂, Spills of up to 5.7 m³ of liquid hydrogen (ca. 402 kg), with spill durations of approximately 35 s. Simulations reported in Middha, Ichard, Hansen & Arntzen (2011).
- HSL experiments (Willoughby & Royle, 2011): Horizontal and vertical releases of LH₂ on a concrete pad, release rate 60 L/min, orifice diameter 26.3 mm, storage pressure 2 bar. Simulations reported in Ichard, et al. (2011).

SMEDIS validation exercise

Several validation studies for dispersion were carried out under the SMEDIS (Scientific Model Evaluation of dense gas DISpersion models), a joint European project conducted under the CEC's Environment and Climate Program 1996-1999. The SMEDIS test cases comprised of:

- The BA-Propane field tests conducted near Lathen, Germany: These tests consisted of a continuous jet release of liquid propane through a 15.5 mm nozzle to form a liquid jet (release rate 3 kg/s; duration of release 160 s). The average wind speed during the test was 3.2m/s, at an angle of -12° with the release direction. The jet was obstructed by a 2m high linear fence 48 m downstream of the release point. Experiments without the obstruction were also performed.
- A laboratory experiment performed at the University of Hamburg (BA-Hamburg, also simulated as a part of the MEP for LNG, see below).
- Thorney Island field tests (Test 21): The experiments was an instantaneous release of a cylindrical column (diameter 14 m, height 13 m) of dense gas located at the centre of a semi-circular fence (diameter 50 m, height 5 m). The initial gas column collapsed under the effect of gravity, and interacted with a semi-circular obstruction down-wind of the release point. The average wind speed was 3.4 m/s, at an angle of -6° relative to the main axis in the tests (Davies & Singh, 1985)
- A field experiment concerning release of chlorine at an industrial facility (EMU experiments): The experiment was performed with a mixture of 10% Cl₂ (by volume) that was released at a rate of 230 kg/s through a nozzle with diameter 1.74 m (release duration 900 s). The average wind speed was 5 m/s.

Good performance of FLACS predictions were seen across the board. The experimental data can be found in Carissimo, et al. (2001). The simulations are described in Gjesdal, Salvesen & Buffet (1999).

Heavy/neutral gas (validation study in early 2000s)

These simulations are described in Hanna et al. (2004) except the last one.

- Kit Fox tests (Hanna and Chang 2001): 52 CO₂ releases, 1.1–4.3 kg/s CO₂ from a pool 1.5 m x 1.5 m, 0.8–4.5 m/s wind, neutral to stable atmospheric conditions
- Prairie Grass tests (Barad 1958): 37 SO₂ tracer release, 40–100 g/s SO₂, 1.5 m/s to 9 m/s wind, unstable, neutral and stable atmospheric conditions
- MUST tests (Biltoft 2001): 43 C₃H₆ tracer releases, 175–225 L/min (about 6 g/s C₃H₆), 1.0–6.8 m/s wind, Generally neutral/stable conditions (night/dusk)
- EMU tests (Hall 1997): A wind tunnel experiment involving a release from an open door in the courtyard area of an L-shaped building. Neutral ambient conditions, continuous release of neutrally buoyant gas
- NYC urban dispersion project (experiments and simulations given in Hanna, et al., 2006): Wind and dispersion validation for tracer gas releases in Manhattan

Tests carried out as a part of the MEP (LNG/heavy gas)

The Fire Protection Research Foundation (FPRF) undertook a research project to develop tools for the National Fire Protection Agency (NFPA) Liquefied Natural Gas Technical Committee to evaluate LNG dispersion models. The work was carried out by the Health and Safety Laboratory (HSL) and they delivered a Model Evaluation Protocol (MEP). The MEP can be used to assess the suitability of dispersion models for predicting hazard ranges associated with large spills of LNG. All the 33 experiments including large-scale experiments and wind tunnel tests and obstructed & non-obstructed experiments have been simulated. The work has been described in several articles and presentations and is summarized in Hansen et al. (2010). This work has also led to the acceptance of FLACS for LNG siting studies by the department of transportation (DOT) in the United States. The experiments as a part of this study include:

Unobstructed tests

- Maplin Sands Tests: 34 spills of LNG onto the sea, release rate 20–30 kg/s, wind speed from 5.5–10 m/s, neutral atmospheric stability (Colenbrander *et al.*, 1984a,b,c)
- Burro Tests: 8 LNG spills onto water, 1.5 m below ground level in a 58 m diameter pond. Release rates $\cong$ 100 kg/s, wind speed 1.8–9 m/s, neutral/stable atmospheric conditions (Koopman *et al.*, 1982a,b)
- Coyote Tests: Similar to Burro (except sensor locations). Wind speeds from 5–10.5 m/s Goldwire *et al.*, 1983)
- CHRC tests (CHRC A): Wind tunnel tests with low momentum release of CO₂ and dispersion over rough surfaces (at a scale of 1:150 of real scale), release rate 33.4 lpm (with 0.5 lpm

propane added as a tracer), wind speed 0.4 m/s (Havens & Spicer, 2005, 2006; Havens *et al.*, 2007)

Obstructed tests

- Falcon tests: Five large scale LNG releases with the goal of evaluating the effectiveness of vapor fences as a mitigation technique for accidental releases, Spills (20–63 m³ of LNG) onto a specially designed water pond equipped with a circulating system to maximize evaporation (Brown *et al.*, 1990)
- CHRC tests (CHRC C): Same as CHRC A described above except the presence of a dike.
- BA-Hamburg tests: Tests in an open circuit wind tunnel involving the releases of Sulfur Hexafluoride (SF₆), experiments at a model scale of 1:164 (Nielsen & Ott, 1996b; Schatzmann *et al.*, 1991)



Figure Picture of Falcon-5 test

Flashing jets

- FLIE_INERIS experiments (Bonnet, et al., 2005): 94 large scale flashing jets (free and impinging) of propane and butane, several different orifice configurations, droplet, rain-out and temperature data
- Desert Tortoise experiments: Four releases of pressurized liquefied ammonia (80–130 kg/s) on an un-obstructed terrain, stable and neutral conditions. Flashing at exit producing a two-phase jet, rain out seen in some tests (Goldwire *et al.*, 1985)
- Additional “validation” has been carried out against the Chlorine release accident at Festus, MO in the United States. These simulations are described in Hanna et al. (2009).

References

1. Al-Hassan, T. & Johnson, D.M. (1998). Gas explosions in large-scale offshore module geometries: Overpressures, mitigation and repeatability, presented at OMAE-98, Lisbon, Portugal.
2. Barad, M.L.(Ed.) (1958). Project Prairie Grass. A field program in diffusion. Geophys. Res. Paper No. 59, Vols. I and II, AFCRF-TR-58-235, Air Force Cambridge research Center, Bedford, MA.
3. Baraldi, D., Kotchourko, A., Lelyakin, A., Yanez, J., Middha, P., Hansen, O.R., Gavrikov, A. Efimenko, A., Verbecke, F., Makarov, D. & Molkov, V. (2009)An inter-comparison exercise on CFD model capabilities to simulate hydrogen deflagrations in a tunnel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(18), 7862-7872.
4. Bauwens, C.R., Chaffee, J. & Dorofeev, S. (2010). Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures. *Combustion Science and Technology*, 182: 1915-1932.
5. Bauwens, C.R., Chaffee, J. & Dorofeev, S. (2011). Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures. *Intl. J. Hyd Ener.*, 36(3): 2329-2336.
6. Becker, T & Ebert, F. (1985). Vergleich zwischen experiment und theorie der explosion grober, freier gaswolken. *Chemie Ingenieur Technik*, 57(1), 42–45.
7. Biltoft, C.A. (2001). Customer Report for Mock Urban Setting Test (MUST). DPG Doc. No. WDTTC-FR-01-121, West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, UT 84022-5000.
8. Bonnet, P., Bricout, P., Jamois, D. & Meunier, P. (2005). Description of experimental large scale two-phase release tests, INERIS report No. 41508.
9. Brossard, J., Desbordes, D., Difabio, N., Garnier, J.L., Lannoy, A., Leyer, J.C., Perrot, J. & Saint-Cloud, J.P. (1985). Truly unconfined deflagrations of ethylene-air mixtures “. Tenth International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), Berkeley, California.
10. Brown, T.C., Cederwall, R.T., Chan, S.T., Ermak, D.L., Koopman, R.P., Lamson, K.C., McClure, J.W. & Morris, L.K. (1990). Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field, Gas Research Institute, Report No. GRI-89/0138, June 1990 (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/6633087-9HP88a/>)
11. Carissimo, B., Jagger, S.F., Daish, N.C., Halford, A., Selmer-Olsen, S., Riikonen, K., Perroux, J.M., Wurtz, J., Bartzis, J., Duim, N.J., Ham, K., Schatzmann, M. & Hall, R. (2001). The SMEDIS database and validation exercise. *Intl. J. Environment and Pollution*, 16, 614-629.

12. Catlin, C., Gregory, C.A.J, Johnson, D.M. & Walker, D.G. (1993). Explosion mitigation in offshore modules by general area deluge, Trans. IChemE, 71, Part B.
13. Chaîneaux, J. (1999). Leak of hydrogen from a pressurized vessel. Workshop on dissemination of goals, preliminary results and validation of methodology. Brussels, March 11, 1999.
14. Chao, J., Bauwens, C.R., Dorofeev, S.B. (2011). An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions. Proceedings of the Combustion Institute, 33: 2367-2374.
15. Colenbrander, G.W., Evans, A. & Puttock, J.S. (1984a). Spill tests of LNG and refrigerated liquid propane on the sea, Maplin Sands 1980: Dispersion Data Digest; Trial 27, Shell Research Ltd, Thornton Research Centre, Report TNER.84.028, May 1984.
16. Colenbrander, G.W., Evans, A. & Puttock, J.S. (1984b). Spill tests of LNG and refrigerated liquid propane on the sea, Maplin Sands 1980: Dispersion Data Digest; Trial 34, Shell Research Ltd, Thornton Research Centre, Report TNER.84.030, May 1984.
17. Colenbrander, G.W., Evans, A. & Puttock, J.S. (1984c). Spill tests of LNG and refrigerated liquid propane on the sea, Maplin Sands 1980: Dispersion Data Digest; Trial 35, Shell Research Ltd, Thornton Research Centre, Report TNER.84.031, May 1984.
18. Cronin, P. & Wickens, M.J. (1986). A large scale experimental study of the conditions required for sustained high speed flame propagation in a flammable vapour cloud. Report No. MRS I 4348. British Gas Corporation.
19. Cronin, P. & Wickens, M.J. (1988). High speed flame propagation in a flammable vapour cloud: Experiments carried out at Spadeadam in 1986/7. Report No. MRS I 4648. British Gas Corporation.
20. Davies, M.E. & Singh, S. (1985). The phase II trials: A data set on the effects of obstructions. *J. Haz. Mater.*, 11, 301–323.
21. Dorofeev, S.B., Bezmelnitsin, A.V., Sidorov, V.P. (1995). Transition to detonation in vented H₂-air explosions. *Comb. Flame*, 103, 243-246.
22. Friedrich, A., Grune, J., Kotchourko, N., Kotchourko, A., Sempert, K., Stern, G. & Kuznetsov, M. (2007). Experimental study of jet-formed hydrogen-air mixtures and pressure loads from their deflagrations in low confined surroundings. In: Proceedings of 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain.
23. García, J., Baraldi, D., Gallego, E., Beccantini, A., Crespo, A., Hansen, O.R., Høiset, S., Kotchourko, A., Makarov, D., Migoya, E., Molkov, V., Voort, M.M. & Yanez, J. (2010). An Inter-comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Deflagration of a Large-Scale H₂-Air Mixture in Open Atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(9), 4435-4444.

24. Gjesdal, T., Salvesen, H.-C. & Buffet, B. (1999). FLACS simulations of SMEDIS scenarios. GexCon report reference CMR-99-F30063.
25. Goldwire, H.C., McRae, T.G., Johnson, G.W., Hipple, D.L., Koopman, R.P., McClure, J.W., Morris, L.K. & Cederwall, R.T. (1985). Desert Tortoise series data report – 1983 pressurized ammonia spills. *Technical Report* UCID-20562, US Lawrence Livermore National Laboratory.
26. Goldwire, H.C., Jr., Rodean, H.C., Cederwall, R.T., Kansa, E.J., Koopman, R.P., McClure, J.W., McCrae, T.G., Morris, L.K., Kamppinen, L., Kiefer, R.D., (Urtiew, P.A. & Lind, C.D.) (1983), Coyote series data report: LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn and rapid-phase transitions, Vols 1 & 2, UCID-19953, Lawrence Livermore National Laboratory (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/195030.pdf> and <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/195363.pdf>).
27. Groethe, M., Colton, J., Chiba, S. (2002). Hydrogen deflagration safety studies in a confined tube. In: Proceedings of the 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, Quebec, Canada.
28. Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., and Iwabuchi, H. (2005). Large-Scale Hydrogen Deflagrations and Detonations. In: Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy.
29. Gupta, S., Brinster, J., Studer, E. & Tkatschenko, I. (2007). Hydrogen related risks within a private garage: Concentration measurements in a realistic full scale experimental facility. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain.
30. Hall, R.C.(Ed.) (1997). Evaluation of Model Uncertainty (EMU)—CFD modelling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU Final Report to the European Commission. WS Atkins Doc No. WSA/AM5017/R7, WS Atkins, Woodcote Grove, Ashley Road, Epsom, Surrey KT18 5BW, UK.
31. Hanna, S.R., Brown, M.J., Camelli, F.E., Chan, S.T., Coirier, W.J., Hansen, O.R., Huber, A.H., Kim, S. & Reynolds, R.M. (2006). Detailed simulation of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan. Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS), December 2006: 1713-1726.
32. Hanna, S.R., Chang, J.C., 2001. Use of the Kit Fox field data to analyze dense gas modeling issues. Atmos. Environ. 35, 2231–2242.
33. Hanna, S.R., Hansen, O.R. & Dharmavaram, S., (2004). FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. Atmospheric Environment, 38: 4675-4687.
34. Hanna, S.R., Hansen, O.R., Ichard, M. & Strimaitis, D. (2009). CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas. Atmospheric Environment, 43: 262-270.

35. Hansen, O.R., Gavelli, F., Davis, S.G. & Middha, P. (2011). Equivalent cloud methods used for explosion risk and consequence studies, Mary Kay O'Connor Process Safety Center 2011 International Symposium, College Station, TX, USA, 25-27 October 2011. In press in Journal of Loss Prevention in Process Industries.
36. Hansen, O.R., Gavelli, F., Ichard, M. & Davis, S.G. (2010). Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapour dispersion. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23: 857-877.
37. Hansen, O.R., Hinze, P., Engel, D. & Davis, S. (2010). Using computational fluid dynamics (CFD) for blast wave predictions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23: 885-906.
38. Hansen, O.R., Renoult, J., Bakke, J.R. (2001). Explosion risk assessment: how the results vary with the approach chosen. Fall Symposium Proceedings, Mary Kay O' Connor Process Safety Centre, Dept. of Chemical Engineering, Texas A&M University, 3122 TAMU, College Station, TX 77843-3122, pp. 395-410.
39. Hansen, O.R., Renoult, J., Sherman, M.P., Tieszen, S.R. (2005a). Validation of FLACS-Hydrogen CFD Consequence Prediction Model Against Large Scale Hydrogen Explosion Experiments in the FLAME Facility. In: Proceedings of International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, September 2005.
40. Hansen, O.R., Storvik, I. E., & Renoult, J. (2005b). Hydrogen R&D at GexCon, experiments and simulations, Fire Bridge Second International Conference. Belfast, Northern Ireland, UK, May 2005.
41. Hansen, O.R., Storvik, I.E. & van Wingerden, K. (1999). Validation of CFD-models for gas explosions, where FLACS is used as example; model description and experiences and recommendations for model evaluation. Proceedings European Meeting on Chemical Industry and Environment III, Krakow, Poland.
42. Hansen, O.R., van Wingerden, C. J. M., Pedersen, G.H. and Wilkins, B.A. (1998). Studying gas leak, dispersion and following explosion after ignition in a congested environment subject to a predefined wind field, experiments and FLACS-simulations are compared: Presented at the ERA-conference 7th Annual Conference on Offshore Installations, London, December 1-2, 1998.
43. Harris, R.J. & Wickens, M.J. (1989). Understanding vapour cloud explosions – an experimental study". 55th Autumn meeting. The Institution of Gas Engineers.
44. Havens, J. & Spicer, T. (2005). LNG vapor cloud exclusion zones for spills into impoundments, Process Safety Progress, Vol 24, Iss 3, pp 181 – 186.
45. Havens, J. & Spicer, T. (2006). Vapor dispersion and thermal hazard modelling, Final topical report to Gas Technology Institute under sub-contract K100029184, October 2006.

46. Havens, J., Spicer, T. & Sheppard, W. (2007). Wind tunnel studies of LNG vapor dispersion from impoundments, AIChE National Spring Meeting, Houston.
47. Hjertager, B.H., Bjørkhaug, M., & Fuhre, K. (1988a). Gas explosion experiments in 1:33 scale and 1:5 scale; offshore separator and compressor modules using stoichiometric homogeneous fuel-air clouds. *J. Loss. Prev. Process Ind.* 1, 197–205.
48. Hjertager, B.H., Bjørkhaug, M. & Fuhre, K. (1988b). Explosion propagation of non-homogeneous methane-air clouds inside an obstructed 50 m³ vented vessel. *J. Haz. Mater.* 19, 139–153.
49. Hjertager, B.H., Fuhre, K. & Bjørkhaug, M. (1984). "Effects of concentration on flame acceleration by obstacles in large-scale methane-air and propane-air explosions". CMI Report No. 843403-5, Chr. Michelsen Institute, Bergen, Norway.
50. Hjertager, B.H., Fuhre, K., Parker, S. & Bakke, J.R. (1982). "Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube". CMI Report No. 813403-5, Chr. Michelsen Institute, Bergen, Norway.
51. Hjertager, B.H., Fuhre, K., Parker, S. & Bakke, J.R. (1983). "Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube". 9th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Poitiers, France, July 3-8, 26 p. Also *Progr. AIAA*, Vol. 94, pp.504-522, 1985.
52. Houf, W.G., Evans, G.H., Merilo, E., Groethe, M. & James, S.C. (2012a). Releases from hydrogen fuel-cell vehicles in tunnels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 715-719.
53. Houf, W.G., Evans, G.H., Ekoto, I.W., Merilo, E. & Groethe, M. (2012b). Hydrogen fuel-cell forklift vehicle releases in enclosed spaces. *International Journal of Hydrogen Energy* (In Press), doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.115.
54. Houf, W.G., Evans, G.H., Schefer, R.W., Merilo, E. & Groethe, M. (2011). A study of barrier walls for mitigation of unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2520-2529.
55. Ichard, M., Hansen, O.R., Middha, P., & Willoughby, D. (2011). CFD computations of liquid hydrogen releases. In: 4th International Conference on Hydrogen Safety, San Francisco, California, 12-14 September 2011; *International Journal of Hydrogen Energy* (In Press)
56. Johnson, D.M., Cleaver, R.P., Puttock, J.S., van Wingerden, C.J.M. (2002). Investigation of Gas Dispersion and Explosions in Offshore Modules, Offshore Technology Conference, Paper 14134, Houston, TX.
57. Koopman, R.P., Baker, J., Cederwall, R.T., Goldwire, H.C., Jr., Hogan, W.J., Kamppinen, L.M., Kiefer, R.D., McClure, J.W., McCrae, T.G., Morgan, D.L., Morris, L.K., Spann, M.W., Jr. & Lind, C.D. (1982a), Burro series data report LLNL/NWC 1980 LNG spill tests, UCID-19075, Vols 1 &

2, Lawrence Livermore National Laboratory (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/194414.pdf>;
<https://e-reportsext.llnl.gov/pdf/194606.pdf>)

58. Koopman, R.P., Cederwall, R.T., Ermak, D.L., Goldwire, H.C., Jr., Hogan, W.J., McClure, J.W., McCrae, T.G., Morgan, D.L., Rodean, H.C. & Shinn, J.H. (1982b), Analysis of Burro series 40 m³ LNG spill experiments J Haz Mats, 6, 43 – 83.
59. Kuzentsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I. & Dorofeev, S. (2005). DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-air mixture. Shock Waves, 14, 205-215.
60. Lacome, J.M., Dagba, Y., Jamois, D., Perrette, L., Proust, Ch. (2007). Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area. In: 2nd International conference on hydrogen safety, 11–13 September 2007, San Sebastian, Spain.
61. Lind, C.D. & Whitson, J. (1977). Explosion hazard associated with spills of large quantities of hazardous materials, Phase II. Report no. CG-D-85-77, United States Dept. of Transportation, Coast Guard Final Report, (ADA 047585).
62. Mackay, D.J., Murray, S.B., Thibault, P.A. & Moen, I.O. (1988). "Flame-jet ignition of a large fuel-air cloud". 22nd. Symposium (International) on Combustion.
63. Makarov, D., Verbecke, F., Molkov, V., Roe, O., Skottenne, M., Kotchourko, A., Lelyakin, A., Yanez, J., Hansen, O.R., Middha, P., Ledin, S., Baraldi, D., Heitsch, M., Efimenko, A. & Gavrikov, A. (2009). An inter-comparison exercise on CFD model capabilities to predict a hydrogen explosion in a simulated vehicle refuelling environment." International Journal of Hydrogen Energy 34(6), 2800-2814.
64. Mercx, W.P.M. (1996). Extended Modelling and Experimental Research into Gas Explosions, CEC EMERGE Project Final Summary Report, EV5VCT930274 (TNO).
65. Middha, P. (2010). Development, use and validation of the CFD tool FLACS for hydrogen safety studies. PhD Thesis, Institute of Physics and Technology, University of Bergen, Bergen, Norway.
66. Middha, P. & Hansen, O.R. (2008). Predicting deflagration to detonation transition in hydrogen explosions. Process Safety Progress 27(3), 192-204.
67. Middha, P. & Hansen, O.R. (2009). Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22(3), 295-302.
68. Middha, P., Hansen, O.R., Groethe, M. & Arntzen, B. J. (2007a). Hydrogen Explosion Study in a Confined Tube: FLACS CFD Simulations and Experiments, 21st International Colloquium of Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Poitiers, France, July 23-27, 2007.
69. Middha, P., Hansen, O.R., Grune, J. & Kotchourko, A. (2010). CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments. Journal of Hazardous Materials, 179: 84-94.
70. Middha, P., Hansen, O.R. & Schneider, H., (2007b). Deflagration to Detonation Transition (DDT) in Jet Ignited Hydrogen-Air Mixtures: Large Scale Experiments and FLACS CFD

Predictions, 12th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industries, Edinburgh, UK, May 22-24, 2007.

71. Middha, P., Hansen, O.R., Storvik, I.E., (2006). Prediction of deflagration to detonation transition in hydrogen explosions, AIChE Spring National Meeting and 40th Annual Loss Prevention Symposium, Orlando, FL, April 23-27, 2006.
72. Middha, P., Hansen, O.R. & Storvik, I.E. (2009). Validation of CFD-model for hydrogen dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22: 1034-1038.
73. Middha, P., Ichard, M., Hansen, O.R., Arntzen, B.J. (2011). Validation of CFD modeling of LH₂ spread and evaporation against large-scale spill experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2620-2627.
74. Nielsen, M. & Ott, S. (1996). A collection of data from dense gas experiments, Riso-R-845 (EN), Riso National Laboratory, Denmark, March 1996
(http://www.risoe.dtu.dk/research/sustainable_energy/energy_systems/projects/rediphem.aspx).
75. Park, D.J., Lee, Y.S. & Green, A.R. (2008). Experiments on the effects of multiple obstacles in vented explosion chambers. *J. Haz. Mat.*, 153(1-2): 340-350.
76. Pedersen, H.H., Middha, P. (2012). Modelling of vented gas explosions in the CFD tool FLACS, 5th International Conference on Safety & Environment in Process & Power Industry, Milan, Italy, June 3-6, 2012.
77. Pedersen, H.H., Tomlin, G., Middha, P., Phylaktou, H. & Andrews, G. (2012). Comparison of FLACS Simulations against Large-Scale Vented Gas Explosion Experiments in a Twin Compartment Enclosure. 9th ISHPMIE, Cracow, Poland, 22-27 July 2012: 26 pp.
78. Peraldi, O., Knystautas, R., Lee, J.H.S. (1986). Criteria for transition to detonation in tubes. *Proc. Comb. Inst.*, 21, 1629-1637.
79. Pförtner, H., Schneider, H. (1984). Tests with Jet Ignition of Partially Confined Hydrogen Air Mixtures in View of the Scaling of the Transition from Deflagration to Detonation, Final Report for Interatom GmbH, Bergisch Gladbach, Germany, Fraunhofer ICT Internal Report.
80. Pritchard, D.K., Freeman, D.J. & Guilbert, P.W. (1996). Prediction of explosion pressures in confined spaces. *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, 9(3): 205-215.
81. Renoult, J., Wilkins, B.A. (2003). Hydrogen Explosion Safety Phase 2 – Small scale explosion experiments, GexCon-03-F46201-2, GexCon, Bergen, Norway (confidential).
82. Schatzmann, M., Marotzke, K. & Donat, J. (1991). Research on continuous and instantaneous heavy gas clouds, Contribution of sub-project EV 4T-0021-D to the final report of the joint CEC-project, University of Hamburg, February 1991.

83. Schefer, R.W., Merilo, E., Groethe, M. & Houf, W.G. (2011). Experimental investigation of hydrogen jet fire mitigation by barrier walls. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2530-2537.
84. Schneider, H & Pförtner, H. (1983). PNP-Sicherheitssofortprogramm, Prozeßgasfreisetzung-Explosion in der Gasfabrik und Auswirkungen von Druckwellen auf das Containment. Dezember 1983.
85. Selby, C. & Burgan, B. (1998). Blast and fire engineering for topside structures, Phase 2, Final summary report, Steel Construction Institute, UK, SCI Publication 253.
86. Sherman, M.P., Tieszen, S.R. & Benedick, W.B. (1989). FLAME Facility, The Effect of Obstacles and Transverse Venting on Flame Acceleration and Transition to Detonation for Hydrogen-Air Mixtures at Large Scale, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, USA, NUREG/CR-5275, SAND85-1264, R3.
87. Shirvill, L. C., Roberts, P. T., Roberts, T. A., Butler, C. J., & Royle, M. (2006). Dispersion of hydrogen from high-pressure sources. In: *Proceedings of Hazards XIX conference*. Manchester, UK, March 27–30, 2006.
88. Shirvill, L.C., Royle, M., Roberts, T.A. (2007). Hydrogen releases ignited in a simulated vehicle refuelling environment. In: *2nd Int. Conference for Hydrogen Safety*, San Sebastian, Spain, 11–13 September 2007.
89. Skippon, S.M. (1985). Large scale confined explosions in a twin compartment vessel. (Unpublished Research). British Gas Research and Development.
90. Statharas, J.C., Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., Wurtz, J. & Schmidtchen, U. (2000). Analysis of data from spilling experiments performed with liquid hydrogen. *Journal of Hazardous Materials*, 77: 57-75.
91. Swain, M. R., Filoso, P. A., & Swain, M. N. (2007). An experimental investigation into the ignition of leaking hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 287–295.
92. Swain, M.R., Grilloit, E.S., Swain, M.N., (1998). Phase 2: Risks in indoor vehicle storage, in *Addendum to Hydrogen Vehicle Safety Report: Residential Garage Safety Assessment*, U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies, Contract DE-AC02-94CE50389.
93. van den Berg, A.C. & Mos, A.L. (2005). Research to improve guidance on separation distance for the multi-energy method (RIGOS). Research report 369, TNO/HSL.
94. van Wingerden, C.J.M., Hansen, O.R., Foisselon, P. (1999). Predicting blast overpressures caused by vapor cloud explosions in the vicinity of control rooms. *Proc. Safety Prog.*, 18, 14–17.
95. van Wingerden, C.J.M., Hansen, O.R., Teigland, R. (1995). Prediction of the strength of blast waves in the surroundings of vented offshore modules, ERA-report 95-1173, London.

96. van Wingerden, C.J.M., Wilkins, B.A. & Pedersen, G.H. (1994). Large-scale laminar combustion tests. Christian Michelsen Research report no. CMR-94-F25064.
97. Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E., Delichatsios, M., Garcia, J., Hansen, O.R., Heitsch, M., Huser, A., Jahn, W., Jordan, T., Lacome, J-M., Ledin, H.S., Makarov, D., Middha, P., Studer, E., Tchouvelev, A.V., Teodorczyk, A., Verbecke, F. & van der Voort, M.M. (2009). An inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (14): 5912-5923.
98. Willoughby, D.B. & Royle, M. (2011). Experimental releases of liquid hydrogen. In: 4th International Conference of Hydrogen Safety, September 12-14, 2011, San Francisco, CA.
99. Witcofski, R.D. & Chirivella, J.E. (1984). Experimental and analytical analyses of the mechanisms governing the dispersion of flammable clouds formed by liquid hydrogen spills. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9 (5): 425-435
100. Witcofski, R.D. (1981). Dispersion of flammable clouds resulting from large spills of liquid hydrogen. NASA Technical Memorandum 83131.
101. Zipf, R. K., Sapko, M. J., & Brune, J. F. (2007). Explosion pressure design criteria for new seals in U.S. coal mines. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 2007-144, Information Circular 9500, pp. 1-76.