



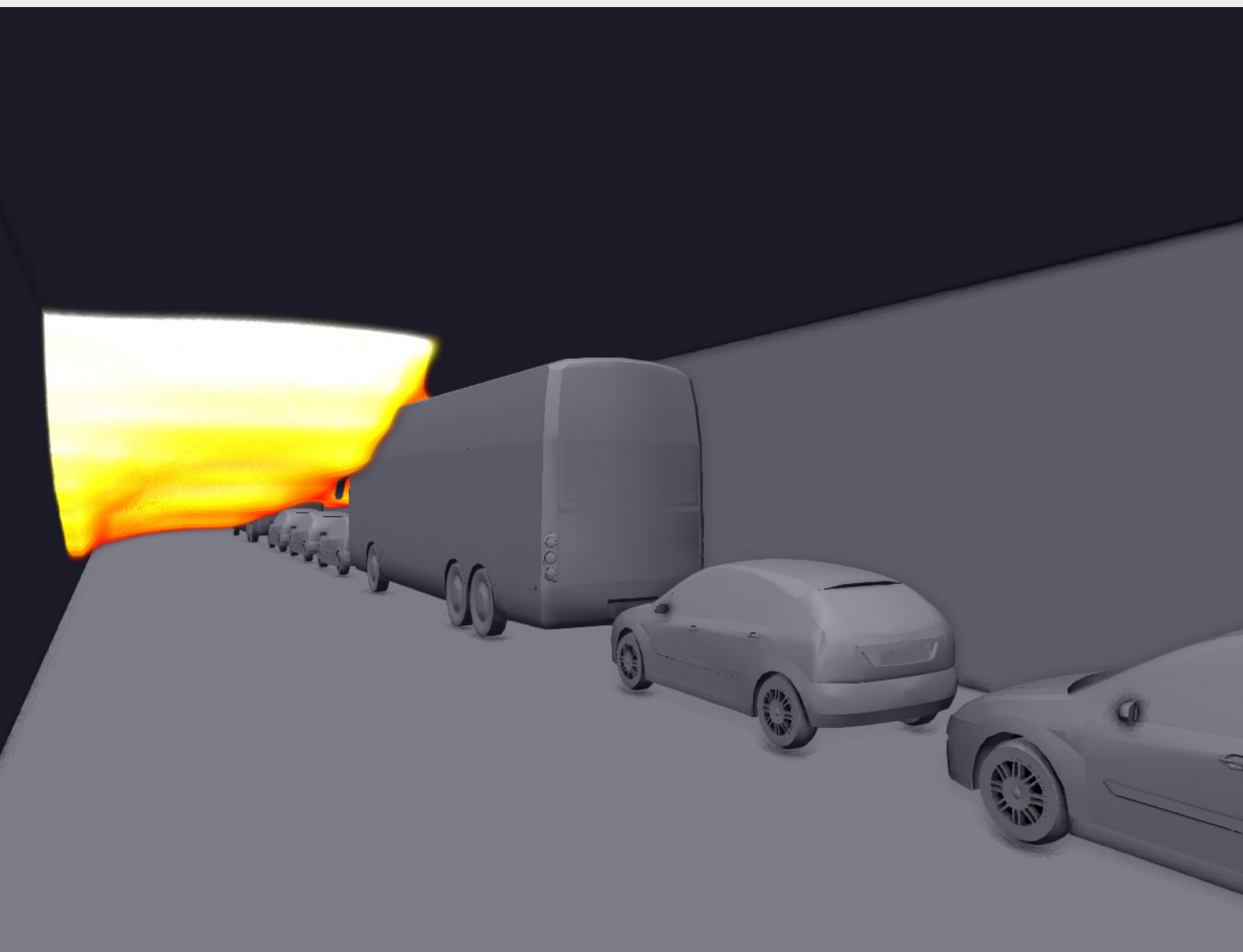
Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap



LUNDS
UNIVERSITET

BERÄKNINGSUNDERLAG

Zonindelning vid räddningsinsatser mot fordon med alternativa bränslen



Zonindelning vid räddningsinsatser mot fordon med alternativa bränslen

Tidsperiod: 2020-11-03

Utförare: Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola

Ansvarig: Marcus Runefors

Beräkningar samt genomgång av litteratur och inträffade händelser har använts för att ta fram rekommendationer för zonindelning vid räddningsinsatser mot fordon med alternativa bränslen (CNG, LNG, Vätgas och batterier).

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

MSB:s kontaktperson: Erik Egardt, 010-240 50 22

Foto omslag: Visualisering från simulering av gasmolnsexplosion i FLACS hämtad från denna studie.

Produktion: Advant

Publikationsnummer: MSB1620 - januari 2023

Tidigare utgiven: november 2020

ISBN: 978-91-7927-060-5

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport. Författaren är ensamt ansvarig för rapporten innehåll.

Innehåll

Sammanfattning	5
Nomenklatur	6
1. Inledning	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte och frågeställningar	10
1.3 Avgränsningar och begränsningar	11
2. Metod	13
2.1 Metodval – CNG och vätgas	13
2.2 Metodval – LNG	15
2.3 Metodval – Batterier	16
3. Skadekriterier	18
3.1 Tryckmässiga skadekriterier	18
3.2 Termiska skadekriterier	21
3.3 Toxiska skadekriterier	22
3.4 Sammanställning av valda skadekriterier	23
4. Inträffade olyckor med alternativa bränslen	25
5. Underlag för zonindelning för fordon med gasformiga bränslen ...	32
5.1 Riskidentifiering för räddningspersonal	32
5.2 Generell indata och antaganden	35
5.3 Scenario 1 – Jetflamma	36
5.4 Scenario 2 – Tankruptur (CNG/Vätgas)	42
5.5 Scenario 3 – Läckage	54
5.6 Scenario 4 – BLEVE (LNG)	54
5.7 Sammanställning av resultat för gasformiga bränslen	55
6. Underlag för zonindelning för fordon med batterier	58
6.1 Riskidentifiering för räddningspersonal	58
6.2 Beräkningar avseende toxisk påverkan	58
7. Sammanställning och förslag till zonindelning	64
8. Behov av vidare studier	67
Referenser	68

Bilaga A – Beräkning av storlek på värmeaktiverad tryckutjämningsanordning för personbil	72
Bilaga B – Beräkningar avseende eldklot vid tankruptur (CNG/Vätgas)	76
Bilaga C – Beräkningar avseende BLEVE	79
Bilaga D – Indata till simuleringar i FLACS	84

Sammanfattning

Ökat behov av hållbara transporter har lett till en betydande ökning av antal fordon med alternativa bränslen på vägarna vilket ökar risken att dessa är involverade i trafikolyckor. Denna rapport undersöker riskavstånd för skyddade och oskyddade personer vid insatser till fordon med alternativa bränslen. De bränslen som undersöks är CNG (komprimerad naturgas), LNG (flytande naturgas) och LiJon-batterier. Studien är avgränsad till händelser på vägar och i tunnlar och därför beaktas inte riskerna i garage eller motsvarande.

En analys av inträffade händelser visar att tankruptur är ett förhållandevis vanligt utfall vid brand i gasfordon (särskilt med komposittankar) och måste därför beaktas vid val av skyddsavstånd och skyddsutrustning. I det fria är själva eldklotet normalt mindre än jetflamman från en eventuell värmeaktiverad tryckutjämningsanordning och i många fall är det istället tryckverkan från gasexpansionen som är dimensionerande. I tunnlar kan eldklotet bli mycket stort vid stora tankar och det kan även bildas höga tryck vid sekundära explosioner i den utsläppta gasen.

Studien visar även på betydande brister i nuvarande kunskapsnivå vilket gör ytterligare studier angelägna.

Nomenklatur

Alternativt bränsle – Annat bränsle än diesel och bensin, t.ex. gas eller batteri.

CNG – Compressed Natural Gas. Komprimerad naturgas som är i gasfas.

BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Närmast momentan förångning av kondenserad gas vid tankruptur som beror på att denna har värmts upp över sin kokpunkt vid atmosfärstryck innan rupturen. Vid antändning av gasen bildas eldklot eller explosion.

Eldklot – Förbränning av gasmoln utan förinblandad luft vilken leder till sk. diffusionsflamma i gränsen mellan (rent) bränsle och luft¹.

Explosion – Förbränning av gasmoln med förinblandad luft vilket leder till sk. förblandad flamma som vandrar från en antändningspunkt genom gasmolnet².

Jetflamma – Momentdriven diffusionsflamma.

LNG – Liquefied Natural Gas. Naturgas som hålls i vätskefas genom nedkyllning (normalt till ca -160°C).

Tryckutjämningsanordning – En anordning som, när den aktiveras under särskilda driftförhållanden, används för att släppa ut gas ur ett trycksatt system (eng. pressure relief device, PRD).

Värmeaktiverad tryckutjämningsanordning – En icke återstängande tryckutjämningsanordning som aktiveras vid en viss temperatur så att ventilen öppnas och släpper ut gasen.

Övertrycksventil – En tryckutjämningsanordning som öppnas vid en förinställd trycknivå och som kan återstängas.

1. Observera att denna definition skiljer sig från den som används i Berghmans och Vainerschot (2014) som refereras i Stenius m.fl. (2020) som definierar detta som en explosion.

2. Om flamhastigheten understiger ljudhastigheten används ibland begreppet deflagration och om den överstiger ljudhastigheten används begreppet detonation. Om explosionen inte medför någon betydande tryckökning så används ibland begreppet flash-fire.

| Inledning

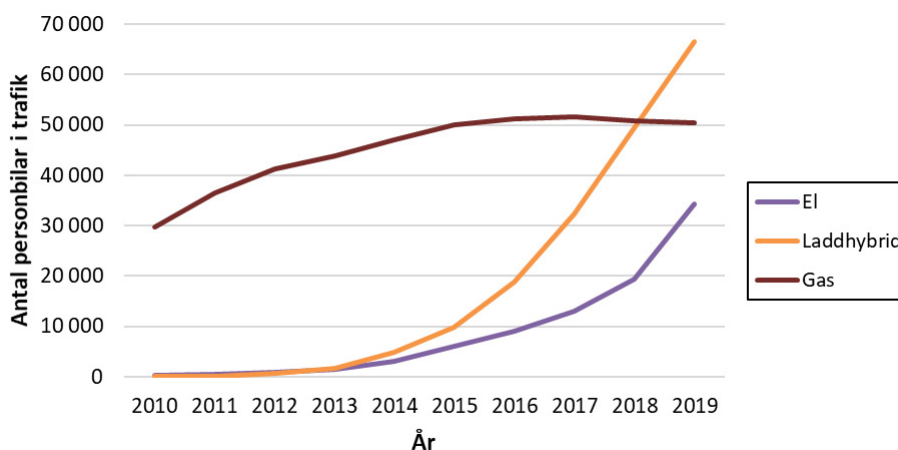
1. Inledning

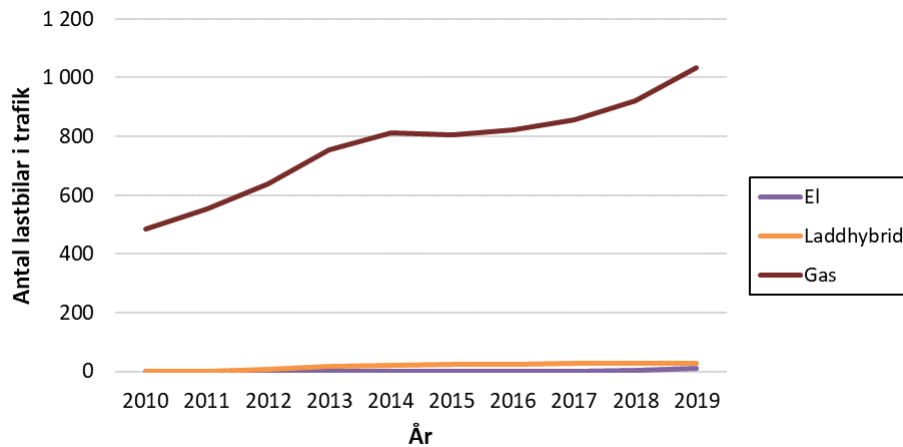
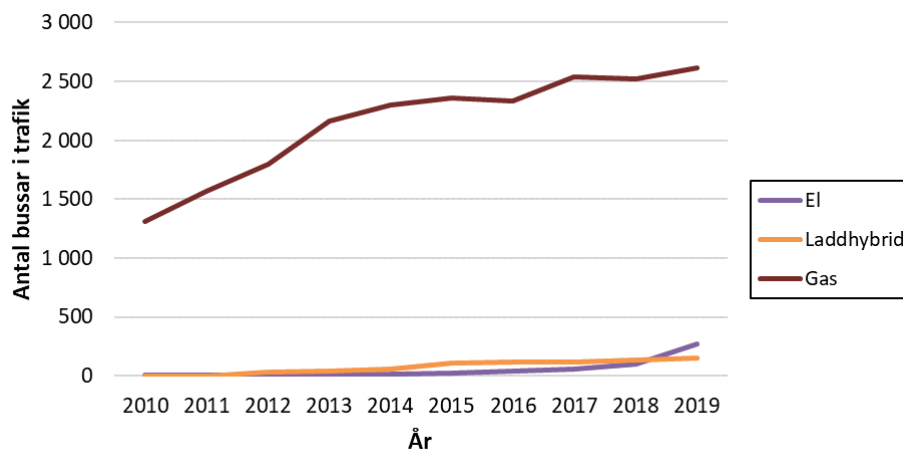
Huvudsyftet med studien har varit att ta fram riskavstånd vid insats mot fordon med alternativa bränslen (CNG, vätgas, LNG och batterier). Detta har primärt uppnåtts genom analys av inträffade händelser samt egna simuleringar i FLACS kompletterat med handberäkningar.

1.1 Bakgrund

En viktig del i omställningen till ett hållbart samhälle är omställningen till ett hållbart transportsystem och för att vi ska kunna fortsätta ta oss till jobb och fritidsaktiviteter är många beroende av att det tas fram hållbara bränslen. Det finns flera alternativa teknologier för detta på marknaden. Den lösning som diskuterats mest på senare år batterier, men även biogas har lyfts fram som ett möjligt alternativ. Flera tillverkare har på senare år även börjat satsa på bränsleceller drivna av vätgas vilket tyder på att denna teknik har börjat närma sig marknaden på allvar. I nedanstående figurer på redovisas förändringen av antalet fordon i olika kategorier under det senaste decenniet.

Figur 1. Antal fordon i trafik med el eller gasdrift (Trafikanalys, 2020). Personbilar och lätta lastbilar.



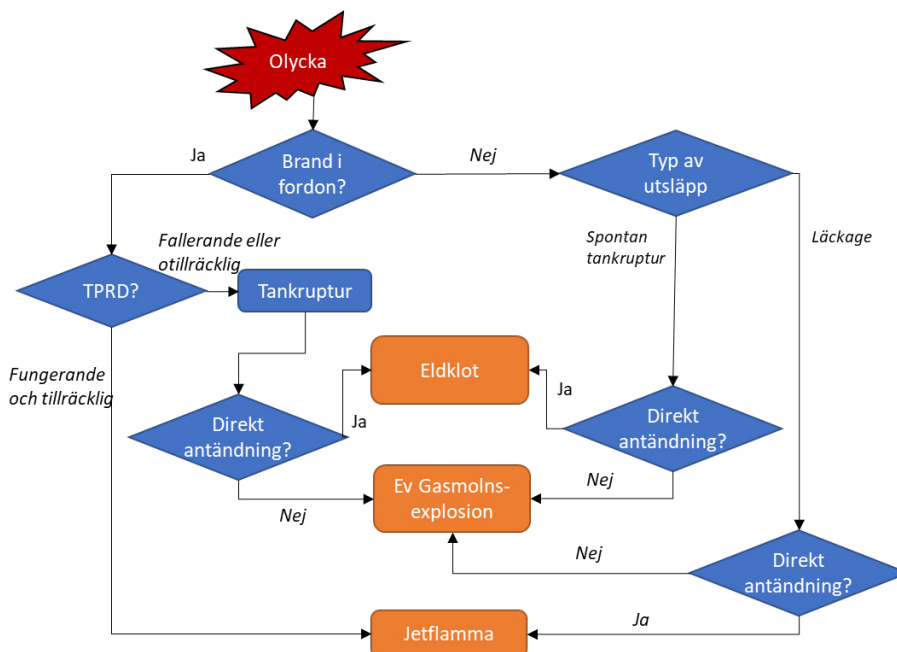
Figur 2. Tunga lastbilar**Figur 3. Bussar**

Som framgår av ovanstående är antalet gasfordon stadigt växande förutom för personbilar där trenden är svagt avtagande. För personbilar har istället eldrift ökat markant de senaste åren. För tunga lastbilar är antalet elfordon och laddhybrider mycket lågt (totalt 39 st i trafik 2019) och detta gäller även delvis bussar. Det finns dock en tydlig ökning av antalet elbussar under 2019 (till 420 fordon) som skulle kunna vara början till en kraftig tillväxt.

I takt med att antalet fordon med alternativa bränslen ökar så ökar också risken att dessa är inblandade i trafikolyckor. När det gäller elfordon har diskussionen primärt handlat om exponering av giftiga gaser, främst vätefluorid, vid brandsläckning, men det förekommer även källor som diskuterar möjligheten av explosion i gaserna som släpps ut vid kokning av elektrolyten (Li, 2018). När det gäller gasfordon så har det förekommit ett antal spektakulära olyckor, inte minst med gasbussar, där ca 20 m långa jetflammar har bildats eller tankrupturer har förekommit (se kap 4). Det har även förekommit fall med läckage från gasfordon.

Ett flödesschema som beskriver alternativa händelseförlopp vid en olycka som involverar gasfordon återfinns nedan.

Figur 4. Flödesschema för olyckor med fordon med gasformiga och kylkondenserade bränslen



Vid de flesta olyckor larmas räddningstjänsten till platsen och eftersom de normalt behöver komma nära fordonet för att kunna bekämpa branden eller hindra läckage så riskerar de därför att drabbas av hastiga förändringar i händelseförloppet som uppkomsten av långa jetflammor eller tankrupturer.

I denna rapport undersöks inträffade händelser kombinerat med egna simuleringar och beräkningar för att undersöka riskavstånd för räddningstjänstens insatser mot fordon med alternativa bränslen såväl i det fria som i tunnlar. Detta kommer att vara ett underlag för MSBs rekommendationer avseende taktik vid insatser mot fordon med alternativa bränslen som kommer att publiceras i närtid.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med rapporten är att ta fram kvantitativt underlag för MSBs rekommendationer för zonindelning och skyddsutrustning vid insatser mot fordon med alternativa bränslen.

Studien utgick från nedanstående frågeställningar.

1. Vilka risker finns vid insatser mot fordon med alternativa bränslen utöver de som finns vid normala insatser?
2. Vilka skador kan dessa händelser orsaka på olika avstånd i såväl det fria som i tunnlar?
3. Vilken skyddsutrustning kan användas och hur påverkar det avstånden?

Indata i form av dimensionerande tankstorlekar för personbil, buss och lastbil har tillhandahållits av MSB för såväl CNG, LNG som vätgas.

1.3 Avgränsningar och begränsningar

Studien avgränsas till olyckor som inträffar i det fria eller i tunnlar medan olyckor i garage eller liknande inte ingår i analysen. Analysen beaktar också endast risker för räddningstjänsten och skador från förlopp som förväntas inträffa innan räddningstjänsten är på plats beaktas därför inte.

Studien har begränsats av tillgänglig tid eftersom det fanns ett behov av att snabbt få fram ett underlag till rekommendationerna. Det har inneburit att analysen till vissa delar inte har kunnat göras så djup som hade kunnat vara önskvärt, t.ex. avseende känslighetsanalys för indata och samstämmighet mellan olika beräkningsmodeller. Den publicerade litteraturen inom området är också mycket omfattande vilket har omöjliggjort en systematisk genomgång inom projektets ramar. Det är därför av avgörande betydelse att arbetet fortsätter med en mer detaljerad analys inom de olika delområdena.

Trots denna betydande begränsning anses publikationen angelägen eftersom det saknas en övergripande sammanställning baserad på relevant indata. Räddningstjänsten behöver omgående ett taktiskt underlag och därför är det olämpligt att avvakta att ta fram rekommendationer till ett slutligt svar på riskavstånden finns framme.

| Metod

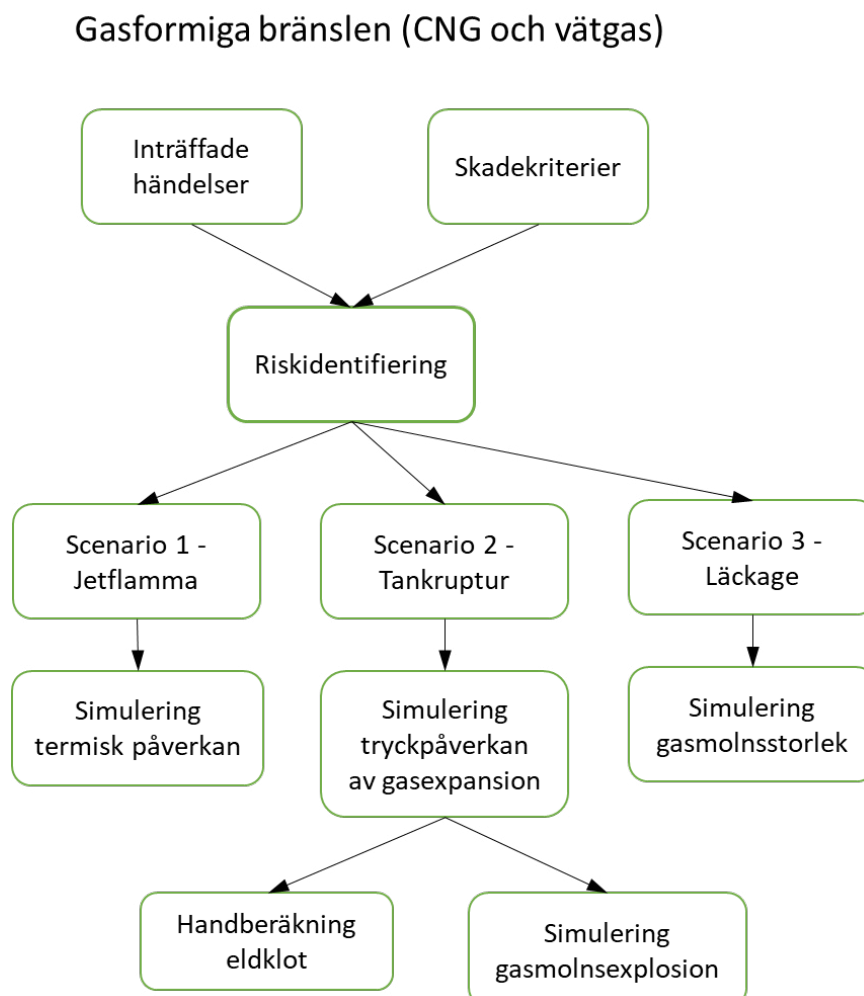
2. Metod

Metoden har utgått från en analys av inträffade händelser som tillsammans med skadekriterier har legat till grund för en riskidentifiering. De scenarier som har identifierats har sedan simulerats i FLACS (Gexcon, 2019), som är en CFD-programvara utvecklad av Gexcon, eller beräknats med handberäkning.

2.1 Metodval – CNG och vätgas

Nedan presenteras en översikt över de scenarier som identifierats.

Figur 5. Flödesschema med metod för fordon med gasformiga bränslen



Nedan följer en kort beskrivning av metoderna för respektive delscenario.

Scenario 1 – Jetflamma

Såväl gastemperatur och strålningsnivå har beräknats i FLACS. Strålningen är beräknad genom att flammen delas upp i ett antal segment där varje segment behandlas som en punktkälla för strålning. Detta har visat en bättre överensstämmelse med försök än DTM-modellen (Gexcon, 2019) som är baserad på fvDOM-metodik. DTM användes dock i regionen där gastemperaturen understeg 500K i enlighet med FLACS standardinställningar.

Källan har antagits ge ett konstant flöde som motsvarar tankens tryck vid normal drift och sedan har storleken på den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen varierats för att hantera att denna varierar mellan olika tillverkare. Eftersom tanken har antagits vara av komposit så har uppvärmning av tankens innehåll försumrats eftersom komposittanken leder värme sämre än ståltank och dessutom är mer känslig för lokal påverkan vilket kan leda till tankruptur istället för jetflamma (se scenario 2).

Vind (5 m/s) i jetflammans riktning har beaktats i beräkningen då den kan medföra att riskområdet ökar (se kap 0).

Scenario 2 - Tankruptur

Om en tankruptur inträffar så kommer gasen som finns inne i tanken att frigöras i princip momentant vilket leder till en snabb expansion av gasen. De stora tryckgradienterna kombinerat med de små tankarna visade sig vara utmanande för att kunna erhålla en numeriskt stabil lösning vid simulering i FLACS. Detta gjorde att en approximering var tvungen att göras. Detta gjordes genom att den faktiska tankstorleken med tillhörande tryck ersattes med en något större tank (som därmed hade lägre tryck), men som hade samma energiinnehåll. Energiinnehållet beräknades med nedanstående ekvation (van Doormal and van Wees, 1996, p. 7.30).

Där E_{av} är den frigjorda energin [J], p och V_g är absoluttryck [Pa] och volym [m^3] hos den komprimerade gasen. Variabeln γ är kvoten mellan gasens specifika värmen [-] och p_a är atmosfärstrycket (Pa).

Gridupplösningen valdes så att kravet på minst 6 celler över högtrycksregionens minsta dimension erhöles (Gexcon, 2019). För att minska beräkningstiden så användes ett symmetriplan genom trycktanken. Det verifierades att detta symmetriplan inte påverkade lösningen signifikant, men ingen känslighetsanalys avseende gridupplösning har genomförts eftersom riktlinjerna i manualen för FLACS följdes.

Beräkningen av eldklotets storlek och varaktighet följde beskrivningen i van Doormal och van Wees (1996) för eldklot i det fria. För eldklot i tunnel användes ekvation för storlek från Li (2018) medan beräkning av varaktighet genomfördes med egenframtagen ekvation. Se bilaga B och C för mer information.

För beräkning av tryckökning vid sekundär explosion användes FLACS. Hela bränslemängden i en tank antogs befinna sig i ett stökiometriskt moln. Beräkningar gjordes både för ett fall med mycket fordon (som riskerar accelerera flamfronten) samt ett fall utan fordon (som ger det lägsta tryckfallet i tunneln).

Scenario 3 - Läckage

Källstyrkan hos ett eventuellt läckage beräknades som den största källstyrkan som inte hade tömt tanken innan räddningstjänstens ankomst (som antogs vara 5 minuter efter läckaget). Detta är ett konservativt antagande eftersom källstyrkan i realiteten avtar som funktion av tanktrycket för en given hålstorlek. Det ansågs dock vara en rimlig förenkling istället för att iterera hålstorlekar till den som gav det största läckaget efter 5 minuter hade uppnåtts.

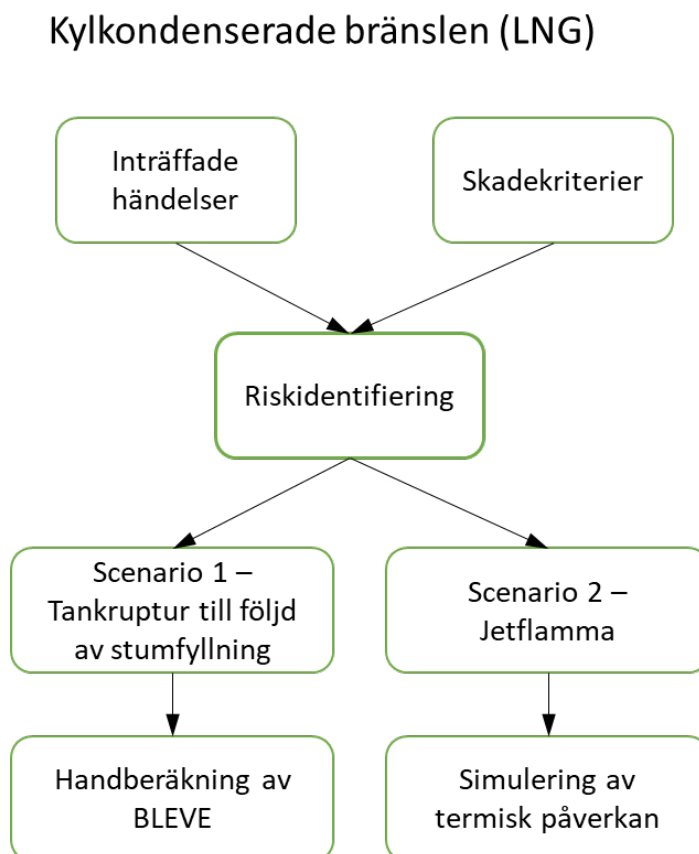
Beräkningen avsåg avstånd till den nedre brännbarhetsgränsen (LEL) hos gasen som ansattes till 4,4% för CNG och 4% för vätgas. Beräkningen utfördes i FLACS och ingen vind togs med i simuleringen eftersom detta har visats vara konservativt (Hagen et al., 2013).

$$E_{av} = \frac{(p - p_a) \cdot V_g}{\gamma - 1}$$

2.2 Metodval – LNG

För kylkondenserade bränslen användes en liknande arbetsprocess och två olika relevanta scenarier identifierades.

Figur 6. Flödesschema med metod för fordon med LNG



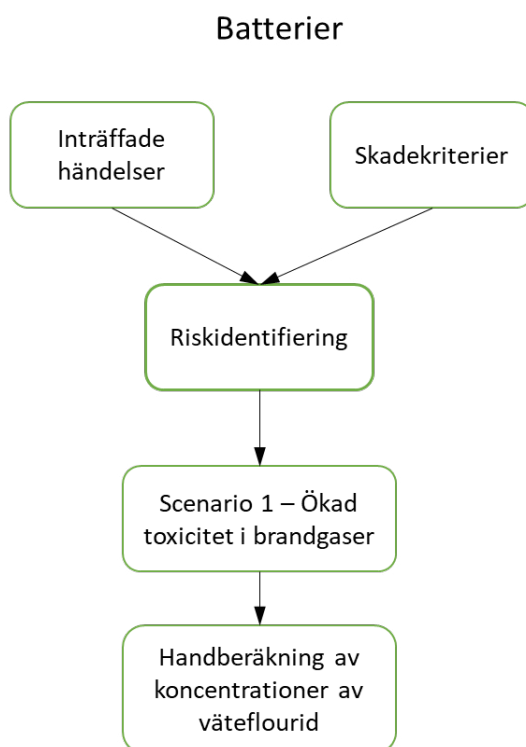
Handberäkningen av BLEVE motsvarar i mycket stor uträkning den som gjordes för eldklot till följd av tankruptur i CNG/Vätgas. Parametrarna i ekvationen valdes dock något annorlunda baserat på en studie med LNG. Se bilaga C för mer information.

Simulering av jetflamma gjordes i FLACS på motsvande sätt som för gasformiga bränslen. Tryck ansattes till 16 bar eftersom detta är normal nivå för aktivering av övertrycksventil.

2.3 Metodval – Batterier

Även för batterier användes arbetsmetoden beskriven ovan. Genomgången av inträffade händelser tydde inte på någon hög risk för stora jetflammar eller utsläpp följt av gasexplosioner och därför analyserades inte detta närmare i detta skede (se dock förslag på vidare studier i kap 8).

Figur 7. Flödesschema med metod för fordon med batterier



En uppskattning av exponeringen för brandgaser med förhöjda koncentrationer med vätefluorid gjordes huvudsakligen baserat på produktionen av vätefluorid i två fullskaleförsök genomförda i litteraturen. Rådata från försöken erhöles genom direktkontakt med artikelförfattarna. Koncentrationen av vätefluorid på olika avstånd från branden uppskattades grovt med hjälp av två plymmodeller. Dessa är framtagna för en situation utan vind (vilket gör att det är osannolikt att brandmän blir exponerade), men en vindpåverkan ökar inblandningen i plymen vilket gör att resultatet är konservativt. Tokikologisk information är hämtat från litteraturen.

| Skadekriterier

3. Skadekriterier

I detta kapitel presenteras skadekriterier avseende tryck, termisk påverkan och toxisk påverkan baserat på tidigare studier.

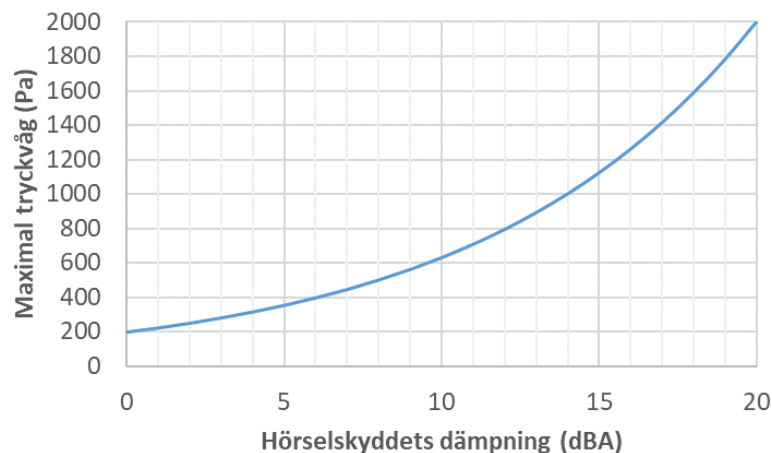
3.1 Tryckmässiga skadekriterier

De tryckmässiga skadekriterierna är primärt baserade på risk för permanent hörselnedsättning. Enligt uppgift från MSB accepterar försvarsmakten en maximal tryckvåg på 200 Pa för att undvika permanent hörselnedsättning. Det motsvarar ett impulstoppvärde på 140 dB(A) vilket är högre än de 135 dB(A) som accepteras i civil miljö enligt 3 § i AFS 2005:16. Detta värde används i denna rapport.

Det bör dock noteras att den direkta översättningen mellan en ljudnivå och ett explosionstryck är en mycket grov approximation, men är normalt konservativ och därmed användbar för grov uppskattning av riskavstånd enligt samtal med akustiker (Gelbe, 2020).

En betydande ökning av trycket kan accepteras om hörselskydd används. Nedan återfinns ett samband mellan den dämpande förmågan hos hörselskyddet och acceptabel trycknivå.

Figur 8. Maximalt övertryck för att undvika hörselskador som funktion av hörselskyddets dämpande förmåga



Den dämpande förmågan är beroende av frekvens och typ av hörselskydd. I många fall redovisas den dämpande förmågan i olika frekvensband (L, M och H) och vid några fasta frekvenser. Osäkerheten i beräkningen är mycket stor eftersom en explosion skiljer sig från normalt buller, men som en första approximation så kan dämpningen vid lågfrekvent buller användas (Gelbe, 2020).

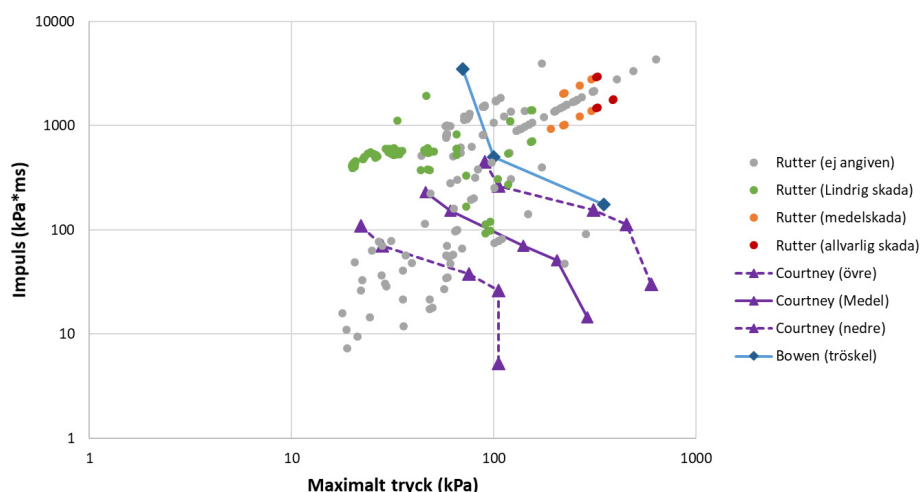
En genomgång av produkterna hos en av de stora tillverkarna visade att en bra öronpropp kan dämpa lågfrekvent buller (63 Hz) med 30,0 dB och bra hörselkåpor kan dämpa motsvarande frekvens med upp till 34,9 dB.

Fallet med både hörselskydd och öronproppar är komplext eftersom det inte med nödvändighet går att addera den skyddande förmågan (Berger, 2001). Eftersom risk för andra allvarliga skador uppkommer redan mellan 30 och 50 kPa räcker dock en extra dämpning hos öronpropparna med mellan 8 och 13 dB för att hörseln ska skyddas mot denna trycknivå. Arbete inom det område som kräver dubbla skydd bör undvikas, men kan sannolikt accepteras under en kortare period i livräddande syfte.

Förutom det maximala trycket kan även impulsen medföra skador på till exempel lungor eller centrala nervsystemet. Impulsen kan även innebära kast av person.

För skador på det centrala nervsystemet så redogör Svensson (2015) för innehållet i två olika källor av Courtney (2011) respektive Bowen (1968). Vidare finns det en doktorsavhandling från 2019 (Rutter, 2019) blast induced traumatic brain injury (bTBI som innehåller ett omfattande datamaterial där resultat från en stor mängd djurförsök i litteraturen har skalats om för påverkan på människor. Om källorna i Svensson (2015) räknas om från varaktighet till impuls (givet en triangulär vågform) kan samtliga tre källor plottas i samma diagram enligt nedan.

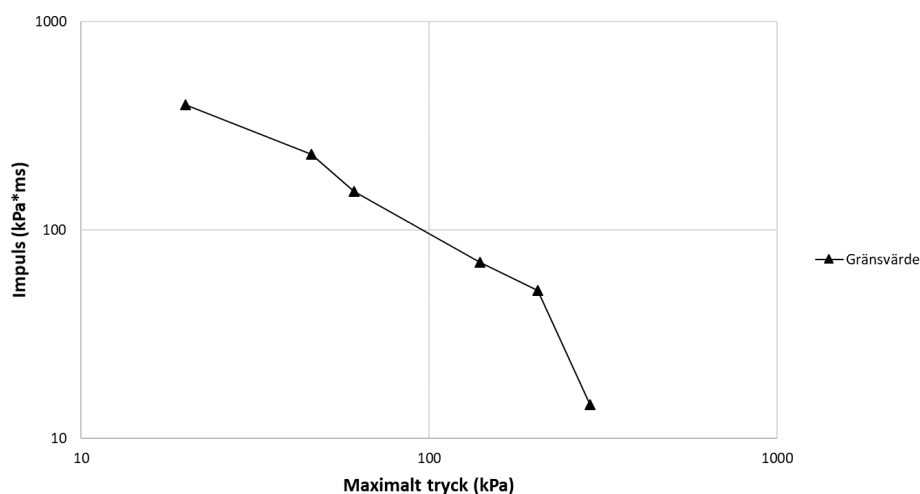
Figur 9. Sammanställning av tre identifierade källor avseende hjärnskador



Det kan konstateras att det finns en betydande spridning i ovanstående diagram. Rutter (2019) blast induced traumatic brain injury (bTBI) föreslår en gräns för lindrig skada som inkluderar samtliga grå punkter (där skadenivå inte är angiven) vilket ger ett mycket lågt värde för såväl acceptabelt övertryck som impuls (17,7 kPa respektive 7,2 kPa*ms). Det anses inte vara realistiskt och inte

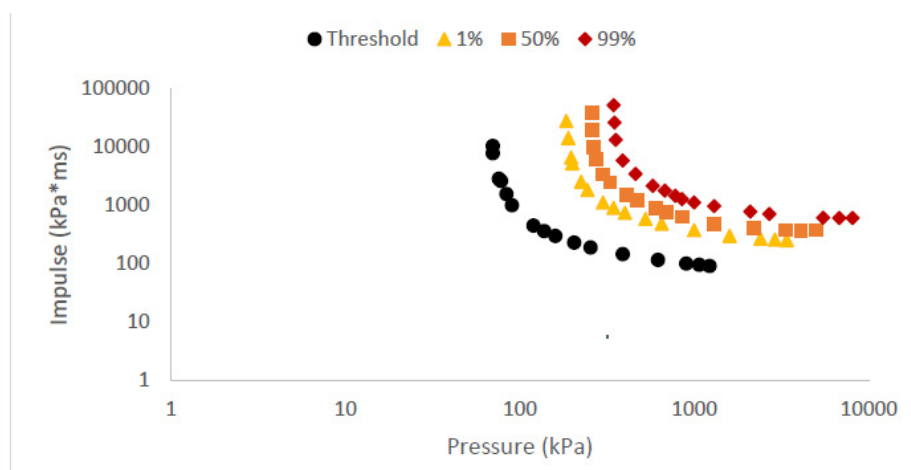
i överensstämmelse med tidigare källor. Därför antas gränsen för acceptabel påverkan följa Courneys medellinje med tillägget att den gröna punkten som befinner sig vid det lägsta trycket inkluderas för att ett acceptanskriterium även ska finnas för lägre tryck. Detta medför nedanstående kurva för acceptabel påverkan.

Figur 10. Gränsvärde för risk för lindrig hjärnskada



Rutter (2019) presenterar även motsvarande kriterier för lungskada enligt nedan.

Figur 11. Lungskador till följd av explosioner med olika maximala övertryck och impulsstätheter (Rutter, 2019)



Det kan konstateras att kurvorna för lungskada ligger högre än motsvarande kurvor för hjärnskada även om de förefaller tangera varandra kring tryck på 100 kPa och impuls kring 100 kPa*ms.

När det gäller risken för kastsador (även kallat tertiära skador) kommer en metod liknande den som presenteras i Svensson (2015) för stelkroppsacceleration utan friktion att användas. Metoden är baserad på Newtons andra lag och tidsintegralen av dragimpulsen fås som utdata från FLACS.

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$\int_0^{t_1} F dt = m \cdot v(t_1)$$

$$\left[\int_0^{t_1} P_D dt \right]_{max} = \frac{m \cdot v_{max}}{A}$$

I ekvationen ovan antas arean på personen vinkelrätt mot tryckvågen vara 0,9 m² (baserad på en person med en längd på 1,8 meter och bredd på 0,5 m). Vikten på personen (inklusive larmställ) antas vara 100 kg och maximal hastighet sätts till 3,9 m/s vilket motsvarar 1% sannolikhet för allvarlig skada (t.ex. benbrott) och hög sannolikhet för lindrig skada (t.ex. blåmärke). Anledning till att förhållandevis allvarliga skador accepteras är att beräkningsmetoden är mycket konservativ eftersom den bortser från deformation av kroppen. Detta medför en högsta acceptabel dragimpuls på 433 kPa*ms.

Det innebär att nedanstående tryck kan accepteras med olika skydds nivåer.

Tabell 1. Maximalt tolerabel påverkan för olika skydds nivåer

Skydds nivå	Storhet	Tolerabelt värde	Kommentar
Utan hörselskydd	Maximalt tryck	0,2 kPa	–
Med öronproppar	Maximalt tryck	6,3 kPa	Baserat på en dämpning på 30 dB
Med hörselkåpor	Maximalt tryck	11,2 kPa	Baserat på en dämpning på 34,9 dB
Med både öronproppar och hörselkåpor	P-I-diagram	enl Figur 8	pga risk för hjärnskador
	Dragimpuls	433 kPa*ms	pga risk för kastskador ³

3.2 Termiska skadekriterier

Termiska skador på människor kan ske antingen genom hög gastemperatur, genom hög värmestrålning eller en kombination av dessa. Det finns metoder i litteraturen för att kombinera värmestrålning och hög gastemperatur för oskyddade personer genom beräkning av den sk. FED-fraktion (Fractional Effective Dose) för värme som beräknas enligt nedan (Purser and McAllister, 2016).

$$FED_{heat}(t) = \int_0^t \frac{\dot{q}^{n,1,33}}{1,33} dt + \int_0^t \frac{T^{3,4}}{5 \cdot 10^7} dt$$

Dessvärre saknas motsvarande uttryck för person med skyddsutrustning vilket är fokus för denna studie. Därför antas strålning och gastemperatur värma upp huden oberoende av varandra vilket är en grov approximation. I många fall

3. Detta kriterium visade sig aldrig vara dimensionerande för riskavstånden. I syfte att öka rapportens läsbarhet så diskuteras detta därför inte vidare i rapporten.

i praktiken kommer dock den ena uppvärmningsmetoden att dominera vilket gör att den ändå kan vara användbart som en approximation.

För värmestrålning av strålningsnivåer som ger smärta efter ca 1 minut använts baserat på Danielsson (1984) vilken uppgår till ca 5 kW/m² vilket även stämmer väl med vägledningen i byggreglerna som anger 2,5 kW/m² vid långvarig och 10 kW/m² vid kortvarig exponering (Boverket, 2013). För kritiska nivåer för person iklädd larmställ används resultaten från försök gjorda av SP (Persson, 1990) som visar att larmställen ger en skyddsfaktor på 4 vilket innebär att en infallande strålning på 20 kW/m² kan accepteras.

För omgivningstemperatur har ingen källa för person med larmställ identifierats. I den europeiska testmetoden för larmställ EN 469 ska larmställen klara 180°C och i den amerikanska testmetoden uppgår motsvarande värde till 260°C (Madrzykowski, 2017). Eftersom exponeringstiden är kort så används det sistnämnda värdet. Det bör också noteras att det absolut vanligaste kriteriet som överstigs i den typen av scenarier som analyseras i innevarande rapport är det strålningsrelaterade kriteriet vilket gör valet av temperaturkriterium mindre känsligt. För person utan skyddsutrustning har en acceptabel temperatur på 180°C vilket kan uthärdas i ca 1 minut (Purser, 2000) vilket gör det är jämförbart med valet av kritisk strålning ovan.

3.3 Toxiska skadekriterier

Toxicitet är ett komplext område och det kan konstateras att det nivågränsvärdet för väteflourid är så lågt som 1,8 ppm enligt AFS 2018:1 (Arbetsmiljöverket, 2018). Dock är det så att den första effekten som uppkommer vid exponering av HF är i luftvägarna (NRC, 2004) och irritation på huden förefaller uppkomma först vid ca 100 mg HF/m³ och uppkom inte vid 50 mg HF/m³ (se Motelius (2005) för en översikt).

Larmställ med andningsskydd ger ett gott skydd mot exponering av väteflourid både avseende andning och hudexponering (Wingfors et al., 2019) och därmed sker den främsta exponeringen i glipor i skyddsutrustningen.

Vid analysen av acceptabel exponering är det i de flesta fall inte tillräckligt att bara beakta koncentrationen utan det är viktigt att även beakta exponeringstiden. I en omfattande analys av tillgänglig litteratur fann NRC (2004) att dosen bör skalas med kvadraten på koncentrationen och att en dos på maximalt 354294 ppm²min är acceptabel för att undvika kroniska skador i luftvägarna. I detta värde finns en säkerhetsfaktor på 10 för att ta hänsyn till variation mellan arter (trots att några sådana inte förväntades). Det bör också noteras att även för detta värde var påverkan i luftvägarna vilket innebär att det bedöms vara en konservativ skattning av påverkan på huden.

För som kriterium för lindrigare skador rekommenderade NRC (2004) att exponeringstiden inte skulle användas utan istället en koncentration på 1 ppm skulle vara gränsvärde. Detta användes, tillsammans med de 1,8 ppm som anges i AFS 2018:1, som gränsvärde för oskyddade personer.

3.4 Sammanställning av valda skadekriterier

I nedanstående tabell framgår de skadekriterier som har använts i rapporten.

Tabell 2. Sammanställning av använda skadekriterier för olika skyddsnivåer

Skyddsnivå	Tryckmässiga skadekriterier	Termiska skadekriterier	Toxiska skadekriterier
Utan skyddsutrustning	0,2 kPa	180°C eller 5 kW/m ²	$C_{HF} > 1-1,8$ ppm
Med hörselskydd	Figur 8 eller 867 Pa*s	–	–
Med rökdykarutrustning	–	260°C eller 20 kW/m ²	$\int_{t_{exp}} C_{HF}^2 dt >$ 354294 ppm ² min



Inträffade olyckor med alternativa bränslen

4. Inträffade olyckor med alternativa bränslen

I nedanstående tabell sammanfattas kända olyckor som har inträffat med gasfordon. Händelser där tanken inte varit påverkad beskrivs inte då de inte är relevanta i förhållande till studiens syfte.

Händelserna har identifierats genom andra sammanställningar av händelser (primärt Stenius et al. (2020)), men mer information (t.ex. bränslemängder osv) har eftersökts i andra källor som t.ex. olycksutredningar.

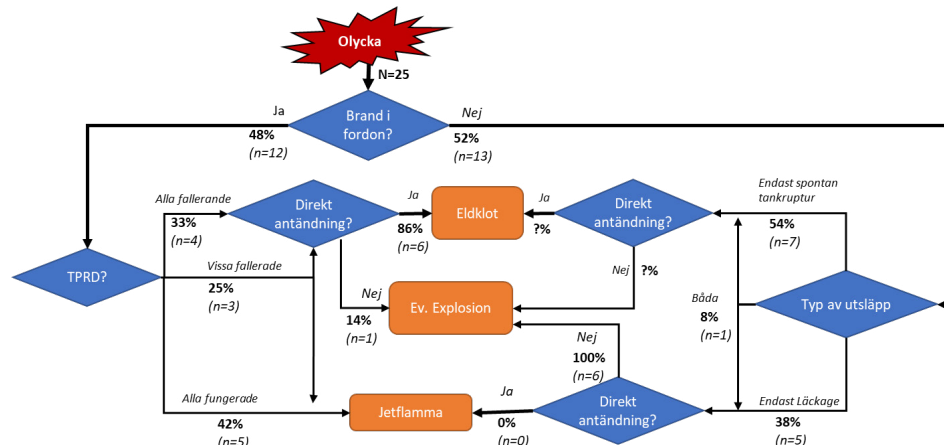
Tabell 3. Sammanställning av identifierade olyckor i gasfordon som involverade gastankarna

Tid och plats	Kort beskrivning	Typ av fordon	Bränsle och mängd	Jetflamma	Tankruptur	Läckage och ev. gasexplosion
2010-01-29 Stockholm	Bilen var konvergerad till LPG, men fylldes med CNG.	Personbil (konverterad Subaru Legacy 1996)	CNG	–	Ja	
2015-05-05 Linköping	Fel på tank gjorde att den exploderade vid tankning.	Personbil (Volkswagen Touran)	CNG?		Ja, föraren skadades bara lindrigt pga befanns sig "en bit" från fordonet.	
2015-07-10 Linköping	Brand i bil och i ett senare skede påverkades tanken.	Personbil (Volkswagen Passat 2010)	CNG?	Ja, 6-7 meter.		
2012-02-14 Helsingborg	Brand i buss som senare påverkade tanken.	Bussar (MAN & Volvo)	CNG	Ja		
2003-05-12 Saarbrücken	Brand i buss som senare påverkade tanken.	Bussar (okända märken)	CNG 10x172 l @ 200 bar (vardera)	Ja, för 19 tankar fungerade PRD.	Ja, för 1 tank pga att PRD skyddades av lucka. Ledde bla till att projektil sköts genom vägg.	
2005-08-01 Montbéliard, Frankrike	Brand i buss som senare påverkade tanken.	Buss	CNG 9x126 l @ 200 bar	Ja, för flertalet tankar.	Ja. Orsakade skador inom ca 100 m radie. Delar av tanken landade på taket på byggnad 30 m bort. Gjorde även att en annan tank flög ca 10 m bort.	
2005-11-08 Bordeaux	Brand i buss som senare påverkade tanken.	Buss	CNG 9x126 l @ 200 bar (men fylld till ca 70-100 bar)	Ja	Ja, värmdes upp av jetflamma.	
2012-10-29 Wassenaar, Nederländerna	Brand i buss som senare påverkade tanken.	Buss (MAN)	CNG 8x213 l @ 200 bar	Ja, 15-20 m långa flammor.		
2014-08-15 Segeberg, Tyskland	Trafikolycka i hög hastighet.	Personbil (Ford Focus)	LPG		Ja, skadade 10 brandmän varav 5 allvarligt. De fick bla svåra bränn-skador. Brandmän med branddräkt klarade sig utan skador.	
2007-03-26 Seattle, USA	Brand på parkeringsplats som senare påverkade en gasbil.	Personbil (Honda Civic)	CNG		Ja, rester av tanken flög 35 m. Troligen pga fallerande PRD.	
2015-02-27 Indianapolis, USA	Brand i soporna som senare påverkade gastank.	Lastbil (Sopbil)	CNG (på taket)		Ja, fem av tankarna exploderade. En landade på marken 400 m bort.	
2015-07-02 Chesapeake, USA	Brand i hydraulolja som senare påverkade gastank.	Lastbil (Sopbil)	Troligen CNG på taket 5 flaskor	Ja		
2016-01-26 Hamilton, USA	Brand i sopbil som senare påverkade tanken.	Lastbil (Sopbil)	CNG (på taket)	Ja, för 3 av 4 tankar.	Ja, för en tank trots fungerade PRD.	
2016-06-17 Borås	LPG (30 bar) tankades med CNG (230 bar).	Personbil	CNG i LPG-tank		Ja, fordonsdelar hittades 40 m bort.	
2016-07-04 Göteborg	Fel på tank gjorde att denna exploderade vid tankning.	Personbil (Volkswagen Touran EcoFuel)	CNG		Ja	
2016-07-12 Göteborg	Brand började på taket på en buss.	Buss	CNG (på taket)		Ja, tryckvåg släckte branden.	
2016-09-20 Katrineholm	Tank exploderade spontant vid körning.	Lastbil (Sopbil)	CNG		Ja, spontant vid körning.	Läckage från övriga tankar när en har exploderat.
2016-11-16 Kramfors	Brand som senare påverkade tankarna.	Personbil	CNG		Ja, splitter 40-50 m från fordonet.	

Tid och plats	Kort beskrivning	Typ av fordon	Bränsle och mängd	Jetflamma	Tankruptur	Läckage och ev. gasexplosion
2017-06-07 Helsingborg	Tankar exploderade vid tankning.	Lastbil (Sopbil)	CNG		Ja	
2017-11-16 Skara	Tankar exploderade vid tankning.	Lastbil (Sopbil)	CNG		Ja, förare slogs till marken och fick föras till sjukhus med lättare skador.	
2018-10-22 Skövde	Brunnslock slog sönder tank ledde till momentant utsläpp och antändning.	Lastbil (Sopbil)	CNG (nära mark)	Troligen, PRD hade löst ut på övriga tankar.	Ja, nummerplåt återfunna 10 m bort.	
2018-10-22 Franeker, Nederländerna	Buss körde in i låg tunnel.	Buss	CNG (på taket)			Ja, släpptes ut via ventilerna när tankarna landat på marken. Ingen antändning.
2017-10-16 Massenhoven, Belgien	Kollision mellan två lastbilar ledde till läckage på tank.	Lastbil	LNG			Ja, från LNG-tank.
2017-07-07 Östersund	Sopbil började brinna.	Lastbil (Sopbil)	CNG	Troligen		
2019-03-10 Stockholm	Buss körde in i för låg tunnel.	Buss	CNG på tak	Ja	Ja, gasflaska flög in i fasaden framför bussen.	Gasmoln (9 m högt och 7 meter brett) antändes.
2019-05-28 Malmö	Brand i buss som sedan påverkade tankarna.	Buss	CNG	Ja (står bara att säkerhetsventiler har löst ut, men utgår från att det antändes).		
2018 Skara	Tankruptur vid tankning.	Lastbil (Sopbil)	CNG, 8 tankar 220-235 bar		Ja, person 25-30 m framför lastbil förs till sjukhus med ambulans. Plastdetaljer återfinns 15 m framför lastbilen.	Stort hål i en tank, men ingen antändning.

Om händelseförloppet sammanställs i ovanstående händelser sammanställs med hjälp av flödesschemat som presenterades i kapitel 1.1 så fås nedanstående bild. Eftersom vissa händelser resulterar i flera delscenarier för olika tankar så modifieras bilden något.

Figur 12. Flödesschema för olyckor med fordon med gasformiga och kylkondenserade bränslen med antal och andel av händelser



Figuren ovan bör tolkas med viss försiktighet eftersom antalet fall är förhållandevis litet. Vissa iakttagelser kan dock ändå göras. Till exempel förefaller det vara ungefär lika vanligt att olyckan beror på brand som att den inte gör det. Vidare så verkar det lika vanligt att den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen hindrar ruptur som att den inte gör det. Det är inte bara intressant ur ett insatsperspektiv utan tyder på ett behov av att förbättra säkerhetssystemen i fordonen. Det kan dock konstateras att flertalet av fordon där tankruptur inträffade inte uppfyller dagens krav i R110 och det finns anledning att tro att många av de inträffade tankrupturerna inte hade inträffat om dessa krav hade uppfyllts.

En översikt av bränder i batterifordon finns t.ex. i Li (2018). Det kan dock konstateras att med undantag från mycket små jetflammor från tryckavlastningen på batteripaketen så skiljer sig inte dessa dessa bränder på ytan inte från vanliga fordonsbränder. Det anses därför inte motiverat att göra en sammanställning av fallen i denna rapport. Läsaren hänvisas istället till Li (2018).



Underlag för zonindelning för fordon med gasformiga bränslen

5. Underlag för zonindelning för fordon med gasformiga bränslen

I detta kapitel görs först en riskidentifiering för räddningspersonalen avseende gasformiga bränslen och därefter beräknas riskavstånd för räddningsinsatsen.

5.1 Riskidentifiering för räddningspersonal

Denna studie är avgränsad till säkerhet efter räddningstjänstens framkomst och därför är händelser med korta förlopp som inträffar i anslutning till olyckstillfallet inte av relevans. Till exempel har samtliga fall med tankruptur utan brand i kapitel 4 inträffat utan tidigare indikation på att något var på gång att hända vilket innebär att räddningstjänsten inte är på plats.

Tankruptur utan brand skulle dock kunna vara relevant om felet upptäcks innan rupturen inträffar. Det skulle kunna vara aktuellt för ett LNG-fordon där tanken stumfylls med LNG-vätska och när denna sedan värms upp till omgivningens temperatur blir trycket för stort för tanken. Det kan dock konstateras att den tryckaktiverade tryckutjämningsanordningen måste falla för att detta ska ske vilket tyder på att scenariot har låg sannolikhet. Scenariot skulle möjligen också kunna inträffa om tanken utsätts för stort krockvåld eftersom LNG-tankar har förhållandevis låga krav att motstå krockvåld (se R110 (United Nations, 2014)). Mest sannolikt är det att det skulle inträffa i samband med kollisionen, men det kan inte uteslutas att de skulle inträffa även i samband med räddningsinsatsen. Om en LNG-tank skulle brista skulle det kunna innebära en form av BLEVE. Detta scenario skulle sannolikt uppkomma i anslutning till tankningsplatsen och därför är det inte relevant att beräkna scenariot för tunnelfallet. Vidare så bedöms det mycket osannolikt att en BLEVE skulle inträffa i LNG pga. extern brand eftersom lastbilar med LNG normalt har tanken i underredet (vilket innebär att den påverkas mindre av en brand i fordonet) och att de dessutom är isolerade för att hålla LNG:n flytande. Experiment har visat att dessa tankar ofta kan hindra en BLEVE under över 1 timme.

Ett annat relevant scenario som har inträffat vid några tillfällen är läckage i en tank. Det är inte sannolikt att hela volymen i fordonet läcker ut eftersom det finns rörbrottsventiler som ska hantera ett sådant fall, men det har förekommit att själva tankarna börjar läcka. Detta kan bero på ruptur i en närliggande tank

eller andra former av skador på tanken. Det är inte sannolikt att ett läckage utan brand ökar i storlek över tid och därför kommer endast små läckage vara relevanta eftersom de måste innebära att tömningstiden överstiger tiden till räddningstjänsten är på plats, som kan antas vara minst 5 minuter. Detta kommer därför att användas för att bestämma den största relevanta källstyrkan. I realiteten kommer källstyrkan minska över tid då trycket i tanken minskar, men som en första förenkling så kommer den antas vara konstant över tid. Källstyrkan blir då enligt nedan enligt Abel-Nobles ekvation för en real gas⁴ (Molkov, 2012).

$$\dot{m} = \frac{m_{tank}}{t_{rtj}} = \frac{pVM}{ZR_{gas}T} \cdot \frac{1}{t_{rtj}}$$

Notera att R_{gas} är gaskonstanten för den aktuella gasen och inte den universella gaskonstanten. Kompressabilitetsfaktorn Z ges av nedanstående samband.

$$Z = 1 + \frac{7,69 \cdot 10^{-3} \cdot p}{R_{gas} \cdot T}$$

Det bör dock noteras att vid en eventuell antändning av ett läckage så bildas normalt en mindre jetflamma vid läckaget och denna kan påverka så att den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen snabbt löser ut och därför bör sannolikt riskavstånd för jetflamma från tryckutjämningsanordning användas om man inte vet att man är i säkerhet i förhållande till riktningen på denna.

Scenarierna kopplad till brand är mer direkt relevanta eftersom inträffade händelser visar att de kan inträffa vid olika tillfällen under räddningsinsatsen i takt med att branden påverkar tankarna. Om den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen löser ut så bildas då en jetflamma vars storlek beror på storleken på tryckutjämningsanordningen, typ av bränsle och tryck i tanken. Det är också förhållandevis vanligt att tankarna värms upp lokalt så att en försvagning av komposittanken gör att det först börjar läcka gas och att det sedan blir en total tankruptur. Denna kan antingen antändas direkt av de omkringliggande flammorna, men det finns även minst ett fall där tryckvågen har släckt branden så att det istället bildas ett moln av brännbara gaser som riskerar att antändas. Om gaserna antänds direkt så kommer förbränningen endast i begränsad utsträckning leda till en acceleration av flammen⁵, men vid bildandet av ett gasmoln kan en andra tryckvåg bildas om molnet antänds. Vätgas är extremt lättantändlig och erfarenhet från inträffade läckage är att även jetflammar tendera att spontant antända utan att det finns några kända tändkällor i närheten (Molkov, 2012). Detta gör det mindre sannolikt att en tankruptur hos en vätgastank kan inträffa utan att den samtidigt antänds, men det har inte bevisats och därför beaktas även detta scenario i analysen.

Vid en brand i anslutning till tanken så kommer en viss temperaturökning av tankinnehållet att ske, men eftersom kompositen (som används i samtliga

4. Trycken i tankarna är normalt så höga att gasmolekylerna trycks så nära att deras storlek inte kan försummas vilket gör att ekvationerna för ideala gaser inte kan användas.

5. Li (2018) påpekar att detta inte nödvändigtvis är sant för vätgas, men då det inte har kunnat identifieras som beskriver detta så har det inte kunnat beaktas i denna studie.

fall med CNG enligt kapitel 5.2) leder värme förhållandevis dåligt och snabbt tappar hållfasthet så bortses från denna temperaturhöjning. Detta motiveras med att det är osannolikt att tankarna är helt nytankade som antas i denna studie och att det dessutom sker en naturlig tryckminskning eftersom gasen värms upp vid tankning och därefter svalnar.

Baserat på ovanstående samt inträffade händelser kan nedanstående tre huvudkategorier av insatser identifieras som sannolikt har betydande skillnader i avstånd för zonindelning. Det är möjligt att vissa av dessa ska slås samman för att underlätta för räddningstjänsten, men dessa hålls separata under analysen.

Tabell 4. Identifierade typinsatser och scenarier

Typinsats	Relevanta scenarier för räddningstjänst	Kommentarer på indata
Brand i fordon	Jetflamma	Läckage motsvarande värmeaktiverad tryckutjämningsanordning.
	Tankruptur med direkt eller fördröjd antändning	Normal mängd bränsle för full tank, ingen temperaturhöjning pga. komposit.
Läckage	Gasmolnsexplosion	Läckage som medger 5 min tömningstid.
Stumfyllning av LNG-vätska	Tankruptur med BLEVE	

5.2 Generell indata och antaganden

Nedanstående fordon och tankstorlekar analyseras i denna studie då de anses vara vanligt förekommande för respektive fordonstyp. Eftersom det inte är praktiskt möjligt att anpassa zonindelningen till olika modeller är det inte heller meningsfullt att analysera fler olika fall. Som framgår av kapitel 5.1 så beror konsekvensen av de olika händelserna antingen bara av bränsletyp och lagringstryck (jetflamma) eller detta kombinerat med största tank (ruptur, läckage och stumfyllning av LNG). Det är därför dessa värden som presenteras i Tabell 5 nedan.

Tabell 5. Sammanställning av dimensionerande fordon

Bränsletyp	Fordon	Dimensionerande tankstorlek	Massa i största tank	Märke/Modell
CNG	Personbil	89 l @ 230 bar	6,2 kg	Daimler B200 NGT
	Buss	375 l @ 230 bar	26,2 kg	MAN
	Lastbil	100 l @ 230 bar	7,0 kg	Volvo
LNG	Lastbil	550 l @ 16 bar	247,5 kg	Scania
Vätgas	Personbil	104 l @ 700 bar	4,1 kg	Hyundai ix35 FCEV
	Buss	312 l @ 350 bar	7,3 kg	Solaris Urbino 12 Hydrogen

Fordon med CNG/LNG kan tankas med antingen biogas eller (fossil) naturgas. Biogas innehåller ca 97% metan medan naturgas innehåller ca 90% metan, 6% etan och 2% propan. I denna studie approximeras bränslet med ren metan.

Tunneldimensionerna antas vara 9 m bred och 4,5 meter hög. En mindre tunnel ger något högre konsekvenser och en större tunnel ger något lägre konsekvenser.

5.3 Scenario 1 – Jetflamma

När en tank utsätts för brand så ökar trycket och samtidigt minskar hållfastheten för materialet. Därför förses tankar alltid med värmeaktiverad tryckutjämningsanordning som öppnar vid en given temperatur. Större tankar förses normalt med en tryckutjämningsanordning vid respektive ände på tanken. När den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen öppnar vid en brand antänds gasen normalt momentant vilket innebär att en jetflamma bildas. Detta är också mycket vanligt vid de faktiska händelser som redovisas i kapitel 4.

En stor utmaning i denna studie har varit bristen på information om storleken på olika värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar. Det finns även olika utföranden som har flera (typiskt 4-6) utlopp. I denna studie har två metoder använts för att fastställa relevanta storlekar på tryckutjämningsanordningarna. Dels har rådata från experimenten av Gehandler och Lönnermark (2019) analyserats i Bilaga A och dels har samarbetsorganisationen BIL Sweden skickat en fråga till sina medlemmar. Resultaten framgår av nedanstående tabell.

Tabell 6. Sammanställning av fri öppningsdiameter storlekar på de värmeaktiverade tryckutjämningsanordningarna

Källa	Fordon	Diameter på tryckutjämningsanordning
Tillverkare	Personbil 1	5 mm
	Personbil 2	3 mm
	Lastbil 1	8,5 mm
	Lastbil 2	8,5 mm
Försök i bilaga A	Okänt	3 mm

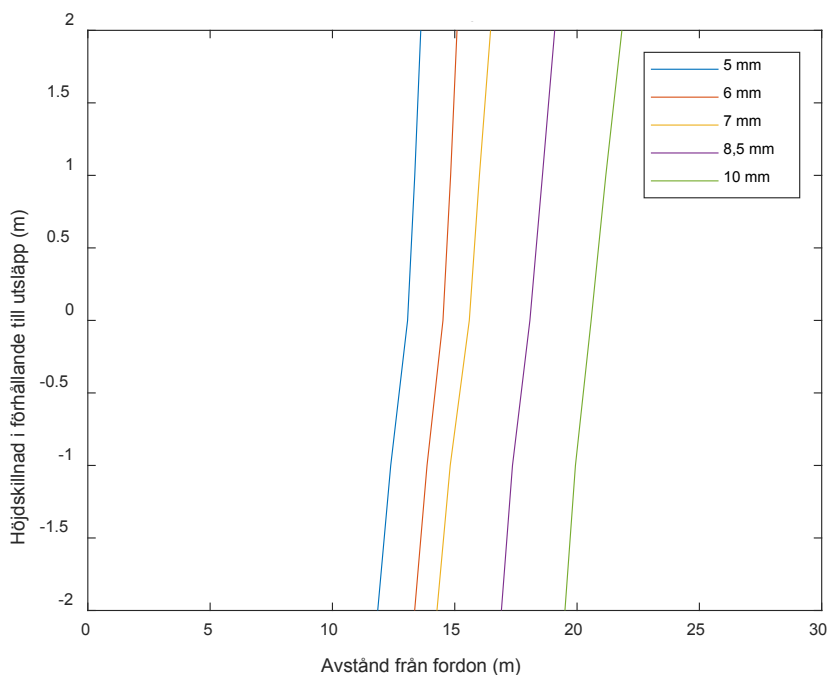
Det är inte känt vilken typ av fordon som tanken i bilaga A är hämtad ifrån och dessutom är den i stål medan övriga är i komposit. Storleken på tanken (35 l) är dock sådan att den är jämförbara med tankarna i personbilar.

Eftersom det förekommer personbilar med värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar på 5 mm så bedöms det inte vara relevant att beräkna riskavstånd för mindre tryckutjämningsanordningar, men eftersom det kan tänkas finnas fordon med större värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar än 8,5 mm så beräknas ett riskavstånd även för 10 mm.

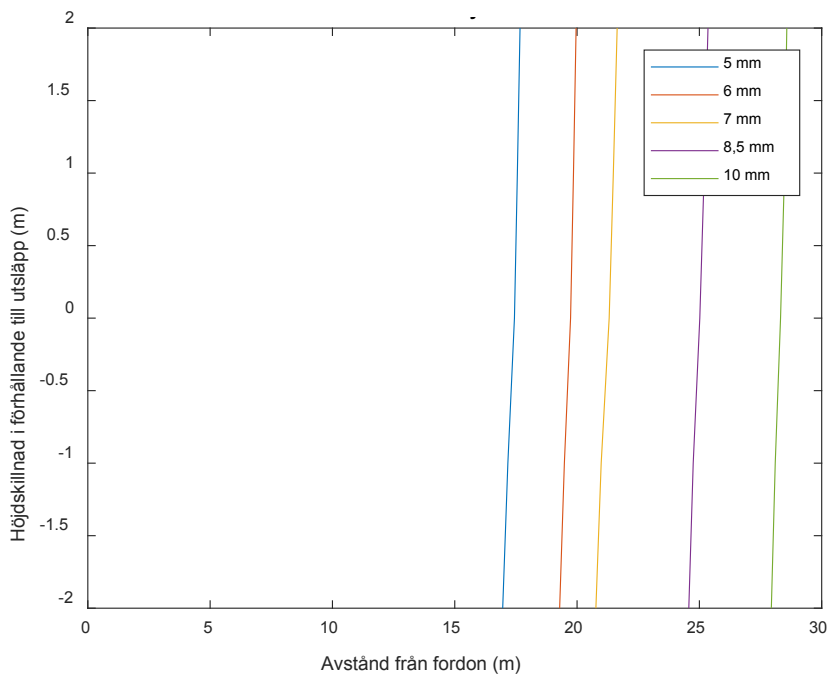
Det bör också noteras att samtliga värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar ovan är för CNG. Det är troligt att liknande storlekar används även för vätgas, men det är inte bevisat.

Långt från flammen så kommer den termiska stignakraften göra att både flammen, men också de varma förbränningsprodukterna stiger och det är därför relevant att resonera i termer av var brandmannen befinner sig i höjddet relativt källans höjd. Det är även relevant om brandmannen kan tänkas befinna sig under själva flammen eftersom påverkan då endast sker utifrån avgiven värmestrålning. Riskavstånden som funktion av höjdskillnad (Z) framgår av nedanstående diagram.

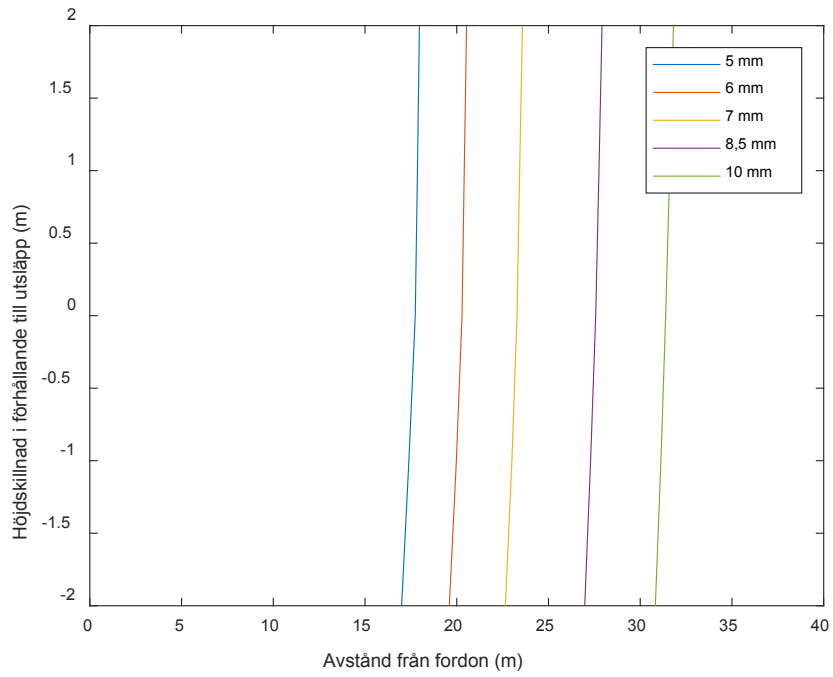
Figur 13. Riskavstånd för CNG beroende på storlek på värmeaktiverad tryckutjämningsanordning och höjdskillnad mellan person och utsläpp. Riskavstånd är för person med skydd (larmställ). CNG med skydd.



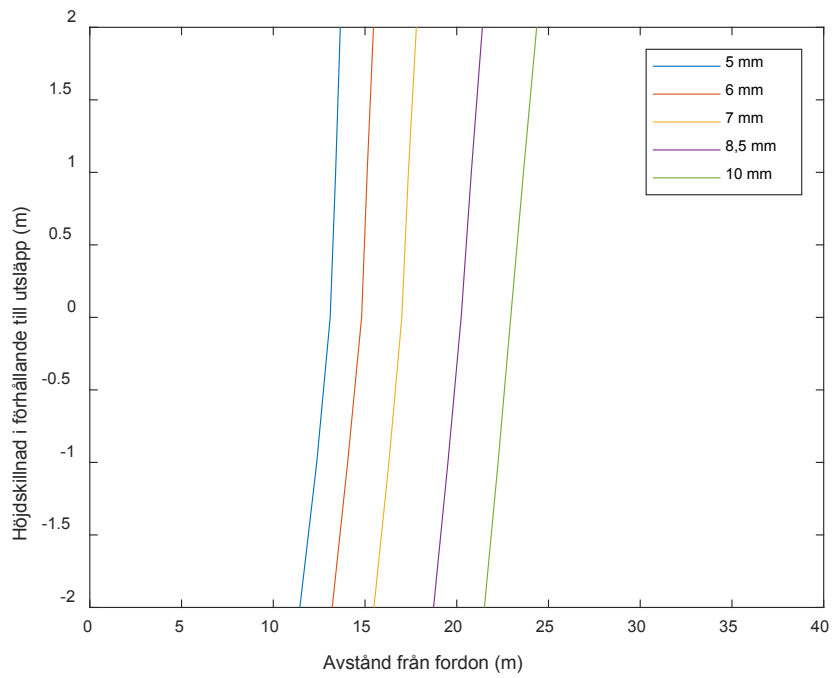
Figur 14. CNG utan skydd



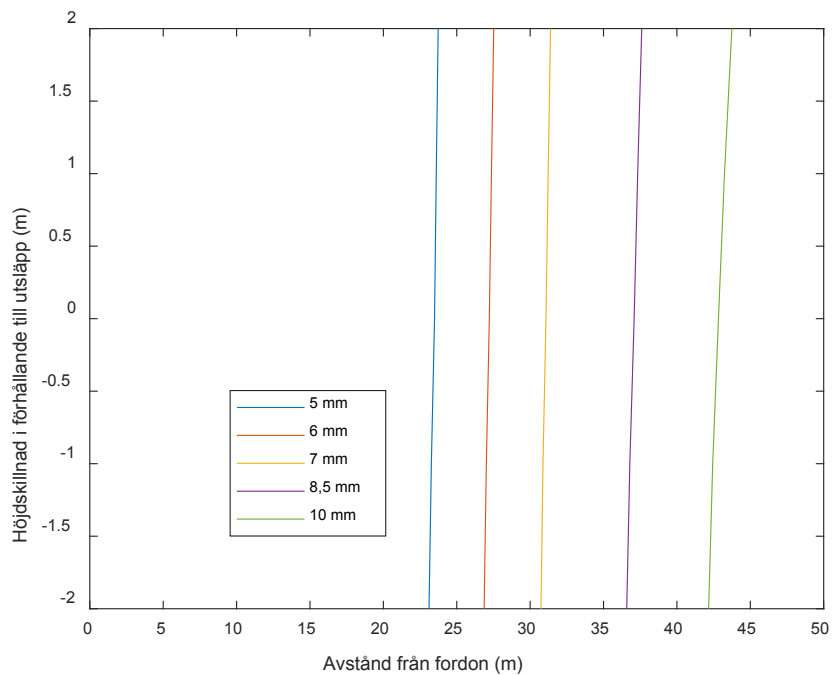
Figur 15. Vätgas 350 bar utan skydd



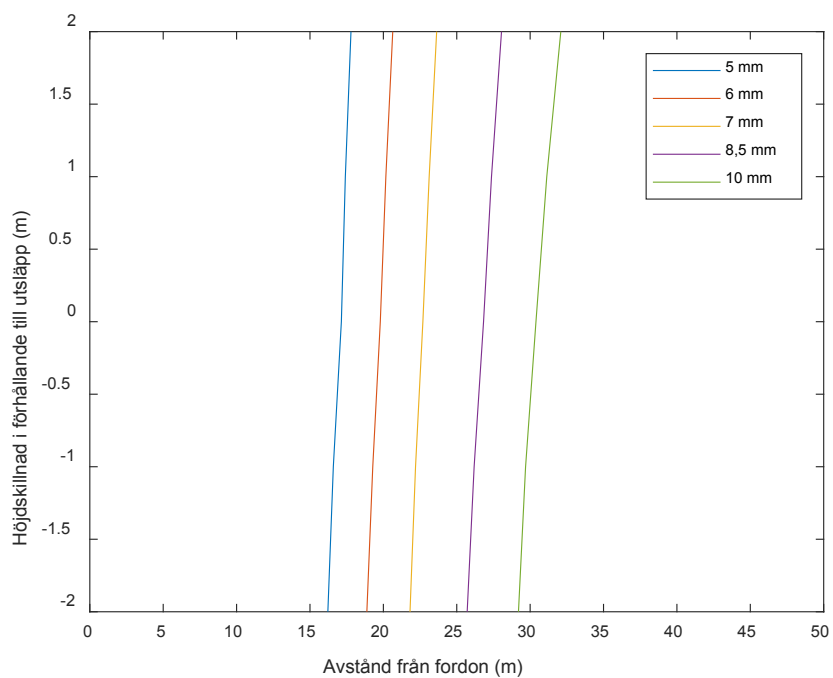
Figur 16. Vätgas 350 bar med skydd



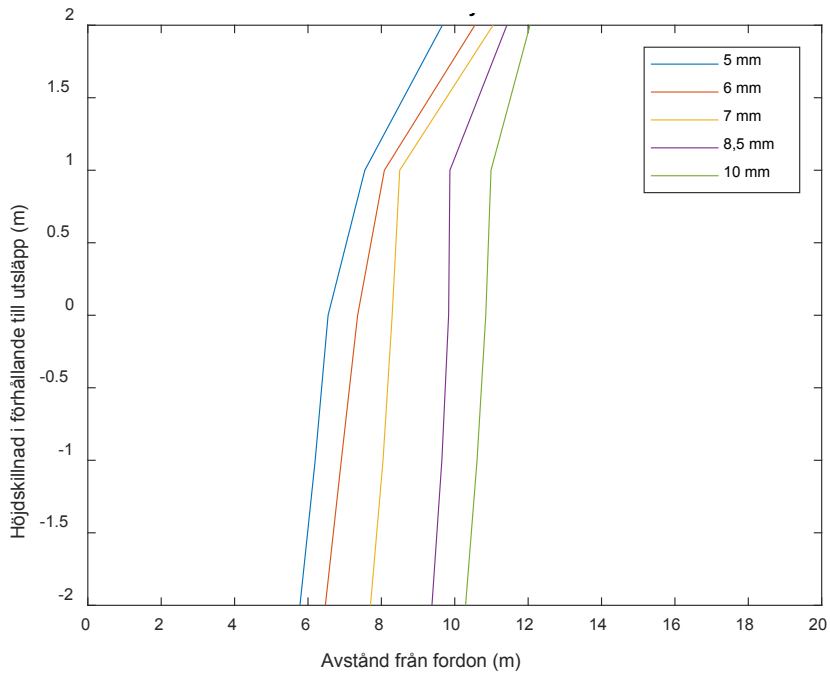
Figur 17. Vätgas 700 bar utan skydd



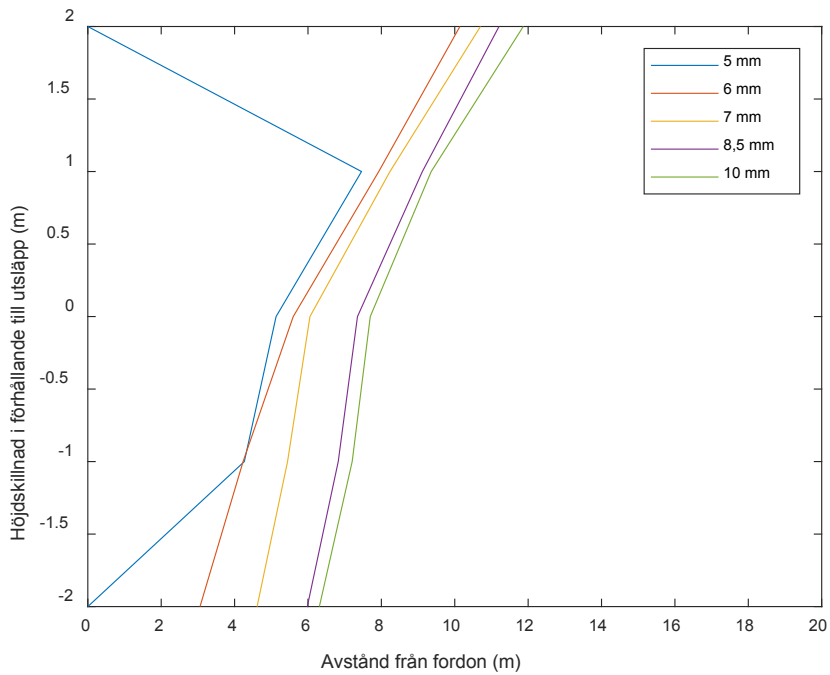
Figur 18. Vätgas 700 bar med skydd



Figur 19. Riskavstånd för LNG för person utan skydd (larmställ) beroende på storlek på värmeaktiverad tryckutjämningsanordning och höjdskillnad mellan person och utsläpp. LNG utan skydd.



Figur 20. Riskavstånd för LNG för person med skydd (larmställ) beroende på storlek på värmeaktiverad tryckutjämningsanordning och höjdskillnad mellan person och utsläpp. LNG med skydd.



Som framgår av ovanstående så är sambandet mellan placering i förhållande i höjded till källan och riskavstånd svagt. Det beror på att strålning normalt är det som avgör riskavståndet och de tolerabla nivåerna är så låga att synfaktorn inte varierar så mycket i förhållande till höjd. Skillnaden mellan riskavståndet 2 meter under utsläppet och 2 meter över utsläppet är som mest 2,9 meter.

Om det antas att personen i normalfallet kan förväntas vara maximalt 1 meter över utsläppets höjd och då fås nedanstående riskavstånd för de olika fallen.

Tabell 7. Riskavstånd för jetflammar för olika storlekar på de värmeaktiverade tryckutjämningsanordningarna och bränslen då personen befinner sig maximalt 1 meter över utsläppets höjd med skydd

Fall	5 mm	6 mm	7 mm	8,5 mm	10 mm
CNG, 230 bar	13 m	15 m	16 m	19 m	21 m
Vätgas, 350 bar	13 m	15 m	17 m	21 m	24 m
Vätgas, 700 bar	18 m	20 m	23 m	27 m	31 m
LNG	7 m	8 m	8 m	9 m	9 m

Tabell 8. Riskavstånd för jetflammar för olika storlekar på de värmeaktiverade tryckutjämningsanordningarna och bränslen då personen befinner sig maximalt 1 meter över utsläppets höjd utan skydd

Fall	5 mm	6 mm	7 mm	8,5 mm	10 mm
CNG, 230 bar	18 m	20 m	21 m	25 m	28 m
Vätgas, 350 bar	18 m	20 m	23 m	28 m	28 m
Vätgas, 700 bar	24 m	27 m	31 m	37 m	43 m
LNG	8 m	8 m	9 m	10 m	11 m

5.4 Scenario 2 – Tankruptur (CNG/Vätgas)

Endast en mindre mängd forskning finns tillgänglig om tankrupturer och det kombinerat med att fenomenet är mycket komplext med interaktioner mellan förhållandevis tröga föremål som tankfragment och fordonet gör att osäkerheten i beräkningarna blir stora. Nedan görs dock ett försök baserat på det som är möjligt med nuvarande kunskapsnivå.

Tankruptur kan bero på flera orsaker, men det som är mest relevant i förhållande till studiens syfte är ruptur till följd av extern brand. Ruptur som beror på fel på tanken bör sannolikt redan ha inträffat när räddningstjänsten kommer till platsen.

Oavsett anledning till rupturen så har en ruptur samma konsekvenser (van Doormal and van Wees, 1996).

1. Utsläpp av innehåll
2. Fragmentering av tanken kopplat till projekteffekter
3. Tryckvåg till följd av expansionen av tankinnehållet

Eftersom den sannolikaste orsaken till en ruptur som är relevant för räddningstjänsten är en brand så skulle man kunna förvänta sig att innehållet alltid antänds omedelbart vilket leder till ett eldklot. Det finns dock minst ett fall (Göteborg, 2016) där tryckvågen från rupturen släckte branden. Detta skulle kunna innebära att det finns en risk för fördröjd antändning vilket skulle kunna leda till en gasmolnsexplosion. Det är mer osannolikt att detta skulle inträffa för vätgas som, på grund av dess låga antändningsenergi, normalt spontanantänds även vid normala läckage (Molkov, 2012), men det kan inte uteslutas och därför analyseras även detta fall.

En annan aspekt som är relevant i förhållande till antändningen av innehållet är om det finns några interaktioner mellan eldklotet och tryckvågen till följd av expansionen som beskrivs senare i detta kapitel. Det finns begränsat med forskning på detta, men bedömningen av Li (2018) att för CNG är denna koppling svag men att den kan finnas för vätgas. Detta är inget som har kunnat beaktas i denna studie och därför antas det att det är två oberoende fenomen.

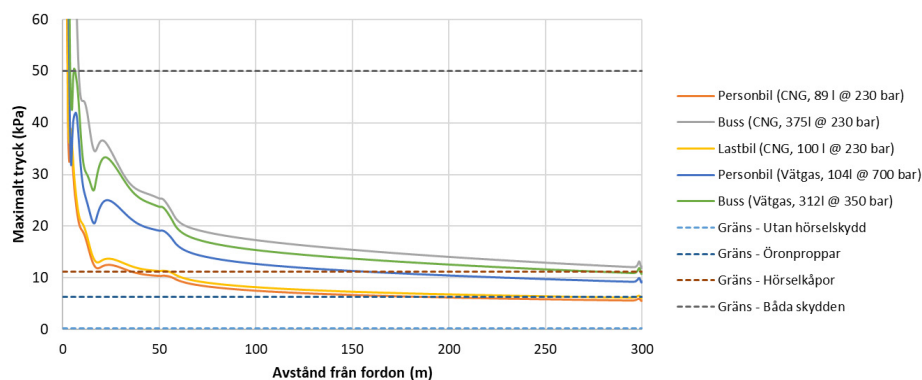
Storleken på eldklotet kan beräknas med förhållandevis enkla analytiska samband som förefaller ge förhållandevis god precision (se t.ex. Zalosh och Weyandt (2005). Beräkningarna för de olika fallen i denna rapport återfinns i bilaga B och resultaten återges i nedanstående tabell.

Tabell 9. Riskavstånd avseende eldklot

Bränsletyp	Fordon	Riskavstånd i det fria (Oskyddad/skyddad)	Storlek i tunnel (från fordon) (Oskyddad/skyddad)
CNG	Personbil	5 m / 5 m	14 m / 8 m
	Buss	9 m / 9 m	45 m / 38 m
	Lastbil	6 m / 6 m	16 m / 10 m
Vätgas	Personbil	5 m / 5 m	10 m / 5 m
	Buss	6 m / 6 m	16 m / 10 m

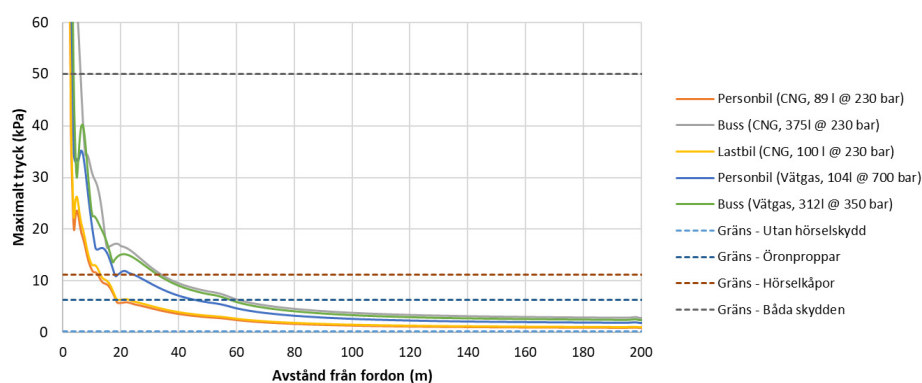
Tryckvågen till följd av gasexpansionen har simulerats i FLACS för en 300 m rak tunnel. Vilket ger nedanstående tryckprofil.

Figur 21. Maximalt tryck i tunnel till följd av gasexpansion vid ruptur

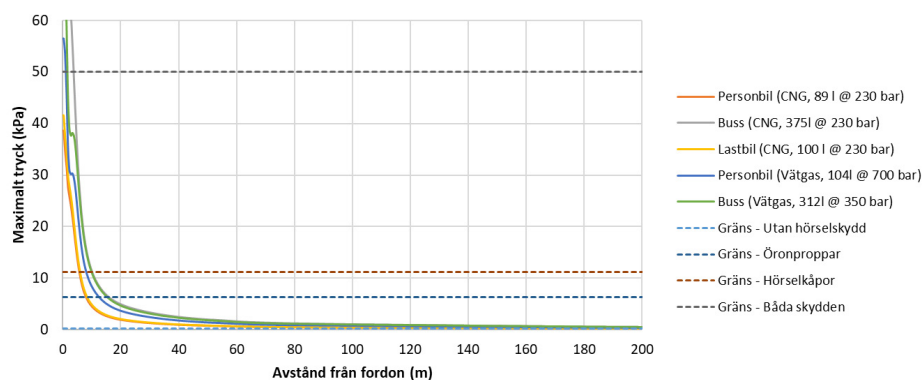


Simuleringar har även genomförts för två fall i det fria. Det ena är ett fall som motsvarar tät stadsbebyggelse där vägen är 9 meter bred och kantas av höga byggnader och det andra som är ett helt öppet fält.

Figur 22. Maximalt tryck i tät stadsbebyggelse till följd av gasexpansion vid ruptur



Figur 23. Maximalt tryck i det fria till följd av gasexpansion vid ruptur



Om trycket vid rupturen av tanken i bussen med CNG i tunnel jämförs med tryck avlästa från diagrammen i Li (2018) för ungefär samma tankstorlek fås nedanstående resultat.

Tabell 10. Riskavstånd för gasexpansion i tunnel. Tryck vid olika avstånd från rupturen.

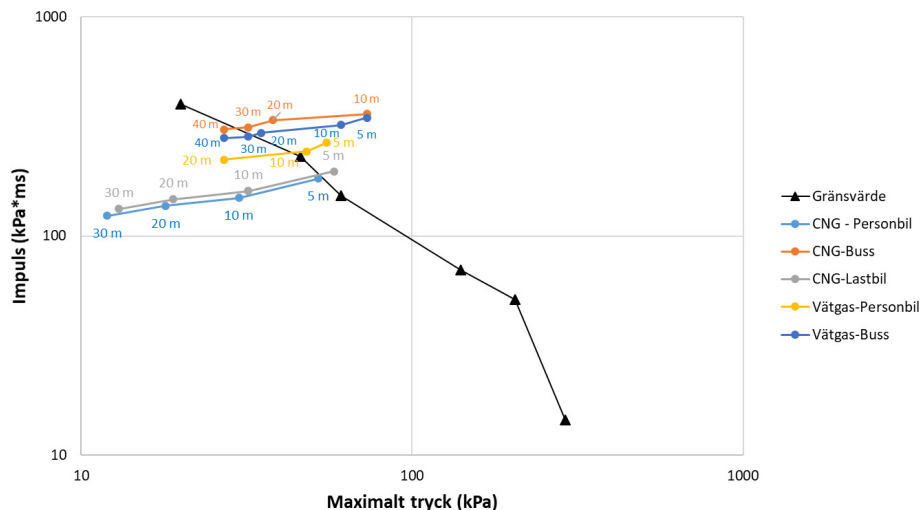
Källa	Tankens massa	50 m	100 m	200 m
Denna rapport	26 kg	25,3 kPa	17,3 kPa	14,1 kPa
Li (2018)	ca 25 kg	ca 22,4 kPa	ca 15,3 kPa	Ca 11,5 kPa
Skillnad		2,9 kPa	2 kPa	2,6 kPa

Som framgår av ovanstående så ligger beräkningarna i denna rapport ca 10% över resultaten i Li (2018) som har en endimensionell modell. Det kan även vara skillnader i valet av vissa beräkningsmodeller.

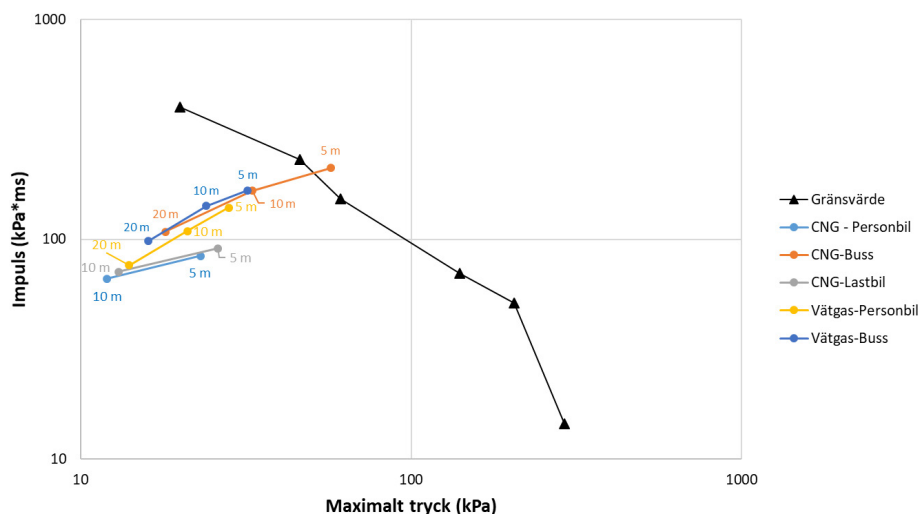
Det bör också noteras att ovanstående är baserad på en helt rak tunnel utan stora svängar. Vid en 90 graders vinkel i en tunnel minskar trycket med ca 30% och efter en T-korsning kan trycket halveras (enl Christopherson (1946) citerad i Johansson och Laine (2012)).

Ovanstående tryckprofiler kan sedan översättas till riskavstånd givet den prestanda på hörselskydd som anges i kapitel 3.1. Det bör dock noteras att trycknivån som innebär att inget skydd behövs (200 Pa) är lägre än de tryck som beräkningsprogrammet FLACS har validerats för.

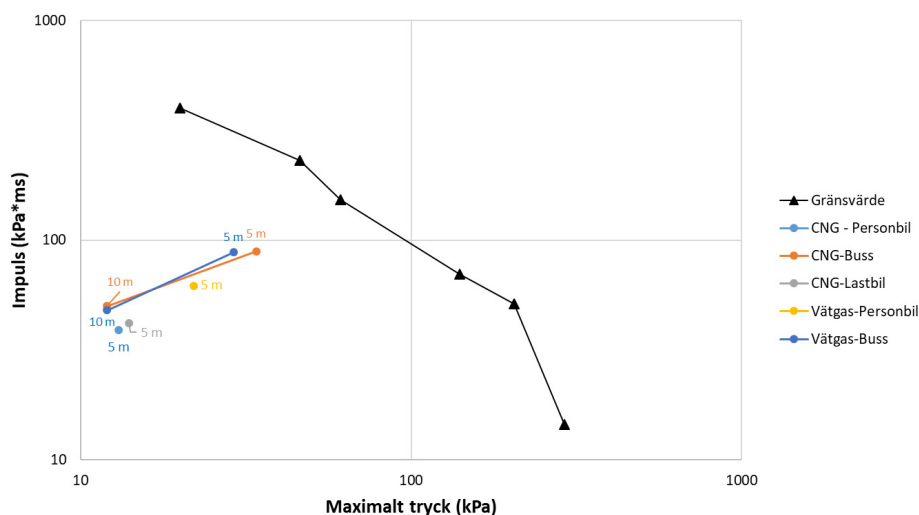
För person med dubbla hörselskydd blir risken för hjärnskada dimensionerande för tolerabel påverkan och denna är en funktion av såväl maximalt tryck som impuls enligt nedan.

Figur 24. Impuls och maximalt tryck till följd av gasexpansionen vid ruptur i tunnel

Figur 25. Impuls och maximalt tryck till följd av gasexpansionen vid ruptur i tät stadsbebyggelse



Figur 26. Impuls och maximalt tryck till följd av gasexpansionen vid ruptur i det fria



Som väntat minskar riskavståndet desto öppnare ett scenario är eftersom det tillåter fler dimensioner för gasexpansionen. Det kan noteras att riskavståndet i tunnel (speciellt för bussarna med CNG respektive vätgas) beror på ett scenario med hög impuls trots ett förhållandevis lågt maxtryck (30 kPa). Det bör hållas i åtanke att gränsfallet för skada är mycket osäkert för så låga maximaltryck eftersom flertalet källor inte anger skadekriterier för så låga tryck. Därför bör ytterligare undersökningar av detta göras.

Baserat på ovanstående resultat så kan nedanstående riskavstånd fastställas för de olika scenarierna.

Tabell 11. Riskavstånd för gasexpansion i tunnel

Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	>> 300 m	196 m	36 m	5 m
	Buss	>> 300 m	> 300 m	> 300 m	40 m
	Lastbil	>> 300 m	264 m	55 m	10 m
Vätgas	Personbil	>> 300 m	> 300 m	157 m	20 m
	Buss	>> 300 m	> 300 m	281 m	30 m

Tabell 12. Riskavstånd för gasexpansion i tät stadsbebyggelse

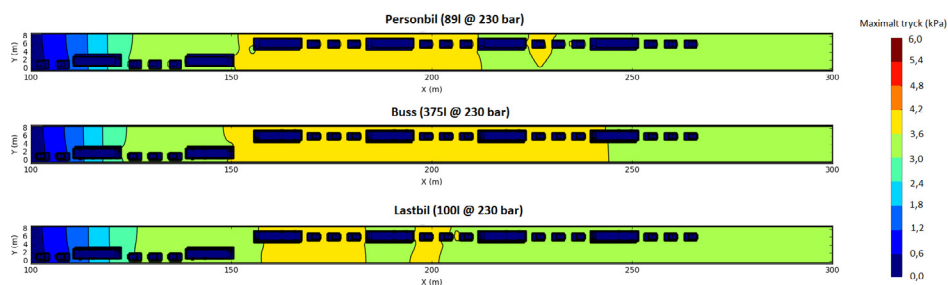
Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	> 200 m	19 m	12 m	5 m
	Buss	> 200 m	61 m	35 m	10 m
	Lastbil	> 200 m	23 m	13 m	5 m
Vätgas	Personbil	> 200 m	46 m	18 m	5 m
	Buss	> 200 m	58 m	33 m	5 m

Tabell 13. Riskavstånd för gasexpansion i det fria

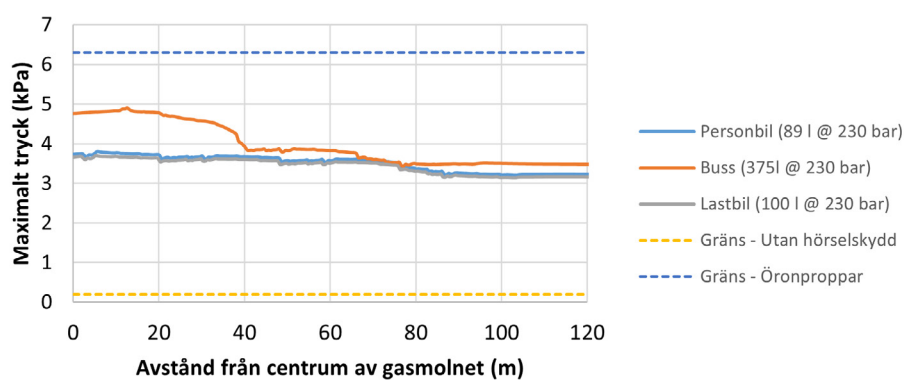
Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	~ 200 m	8 m	6 m	5 m
	Buss	> 200 m	16 m	10 m	5 m
	Lastbil	> 200 m	9 m	6 m	5 m
Vätgas	Personbil	> 200 m	13 m	8 m	5 m
	Buss	> 200 m	16 m	10 m	5 m

Som nämndes ovan så finns det en möjlighet att tankrupturen släcker branden och då skulle en fördröjd antändning kunna ske vilket skulle leda till en gasmolnsexplosion. Det kan inte på förhand avgöras om den största tryckökningen skulle ske i en tunnel med eller utan fordon. En tunnel med fordon skulle leda till en större turbulens i flamfronten vilket skulle accelerera förbränningshastigheten och därmed öka explosionstrycket. Å andra sidan innebär en tom tunnel det lägsta tryckfallet när tryckvågen transporteras längs tunneln och därmed potentiellt ett högre tryck långt från det drabbade fordonet. På grund av detta har båda fallen simulerats. Resultaten framgår i nedanstående figurer.

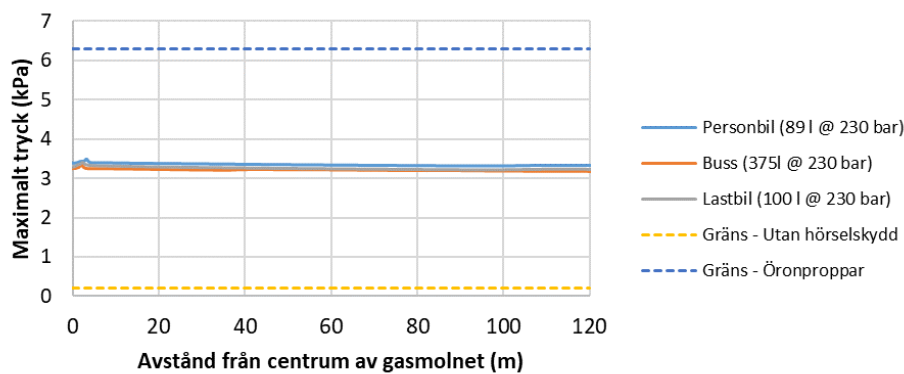
Figur 27. Maximalt tryck i tunnel med fordon med CNG. Gasmolnet är placerat från x=160 och uppåt



Figur 27. Maximalt tryck i tunnel med fordon respektive utan fordon där CNG exploderar

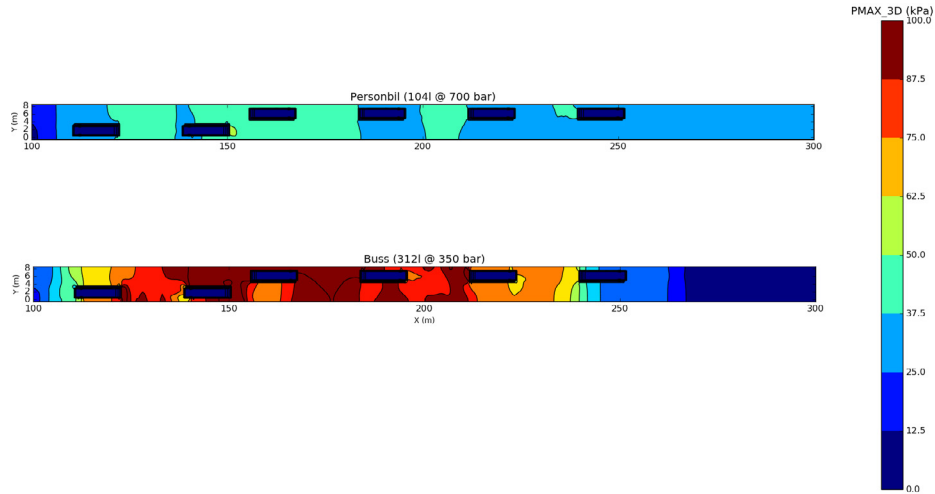


Figur 28. Maximalt tryck i tunnel utan fordon där CNG exploderar

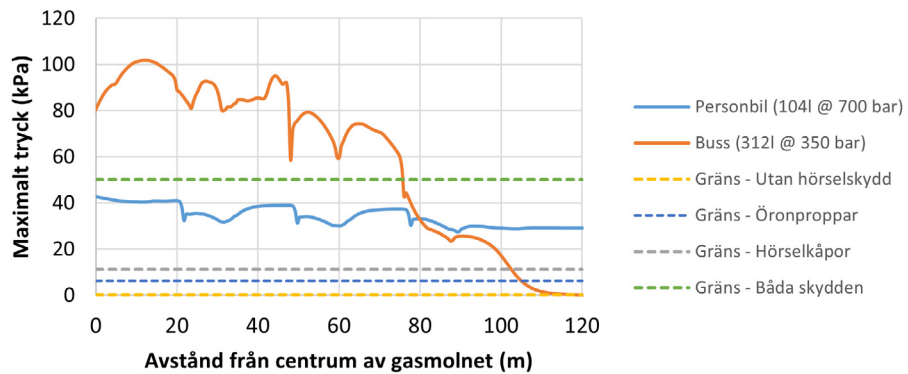


Nedan finns motsvarande resultat för fordon med vätgas som bränsle.

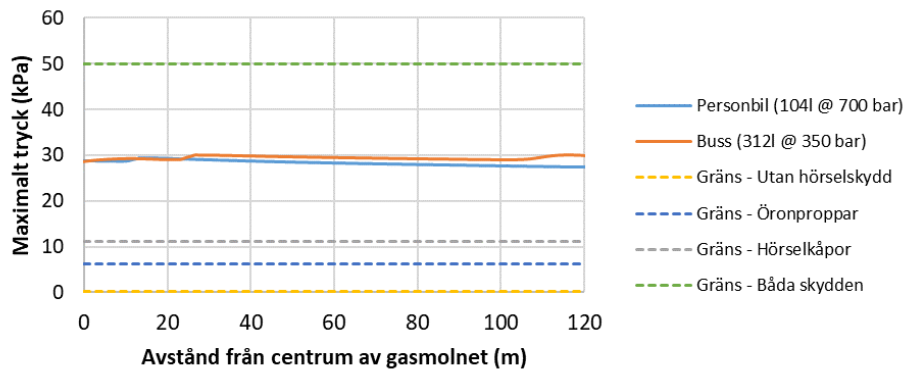
Figur 29. Maximalt tryck i tunnel med fordon med vätgas. Gasmolnet är placerat från x=160 och uppåt



Figur 30. Maximalt tryck i tunnel med fordon respektive utan fordon där vätgas exploderar



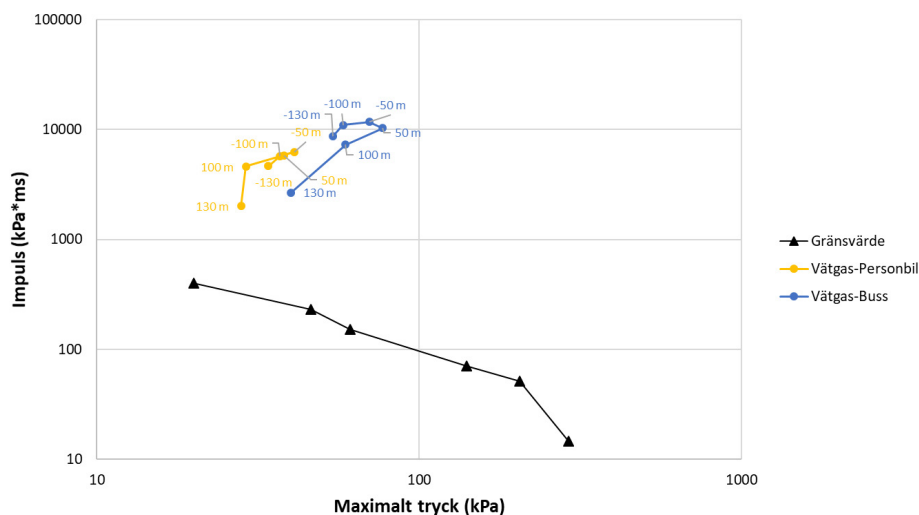
Figur 31. Maximalt tryck i tunnel utan fordon där vätgas exploderar



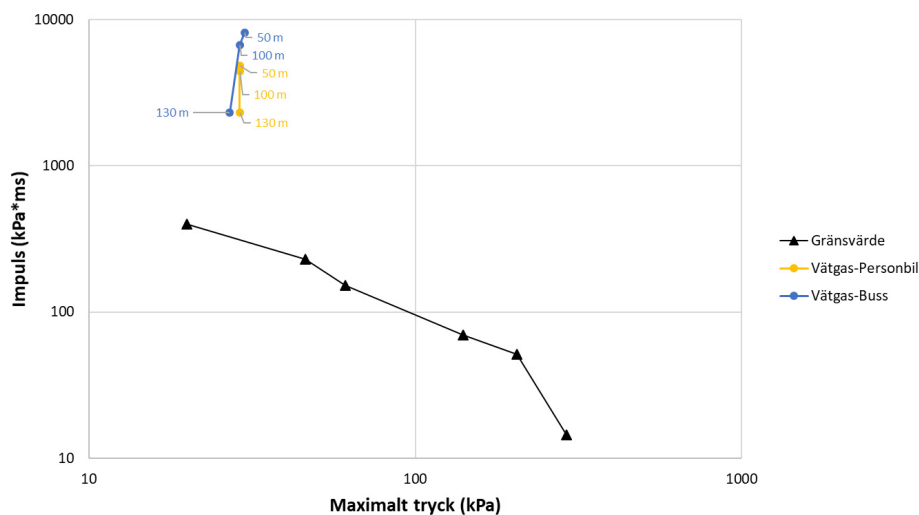
Det kan noteras att för den stora vätgastanken finns en betydande interaktion med fordonen i tunneln som ökar trycket med ungefär en faktor 3 i anslutning inom ca 80 meter från centrum på gasmolnet.

Trycken som genereras med CNG är så låga att inga hjärnskador bör, utifrån identifierad litteratur, kunna inträffa, men för vätgas är det relevant att analysera risken för hjärnskador vilket framgår av nedanstående diagram.

Figur 32. Impuls och maximalt tryck i tunnel med fordon



Figur 33. Impuls och maximalt tryck i tunnel utan fordon



Även om uppkomsten av hjärnskador vid så låga tryck som 30-40 kPa är högst osäkert så kan det inte uteslutas att lindriga hjärnskador kan uppkomma i fallen med vätgas. Det bör dock hållas i minnet att beräkningarna är mycket konservativa (allt bränsle i stökiometriskt moln), men med nuvarande kunskapsnivå går det inte bevisa att det är säkert för räddningspersonal att vistas i tunnlar med risk för vätgasexplosion.

Tabell 14. Riskavstånd i tunnel för sekundär explosion (observera dock eldklotsstorlek tidigare i detta kapitel samt att avstånden i tunneln med fordon är beroende av den exakta layouten)

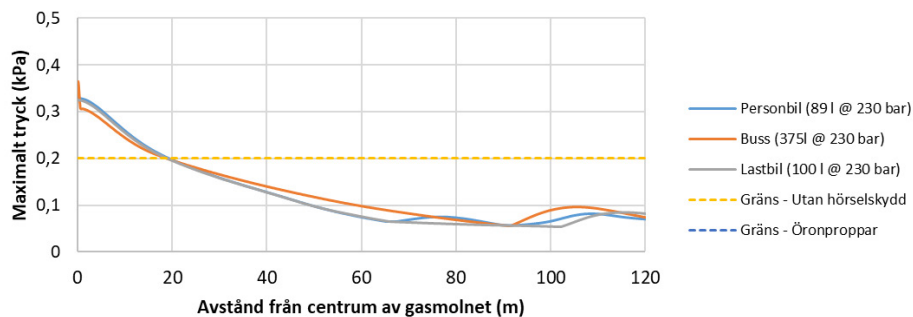
Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	>> 120 m	0 m	0 m	0 m
	Buss	>> 120 m	0 m	0 m	0 m
	Lastbil	>> 120 m	0 m	0 m	0 m
Vätgas	Personbil	>> 120 m	>> 120 m	>> 120 m	>> 120 m
	Buss	>> 120 m	>> 120 m	>> 120 m	>> 120 m

I liket med explosionen som berodde på gasexpansionen så är tryckminskningen längs tunneln högst begränsad. Det blir extra tydligt i dessa fall där starttrycket normalt är lägre än för gasexpansionen och därmed tryckfallet lägre.

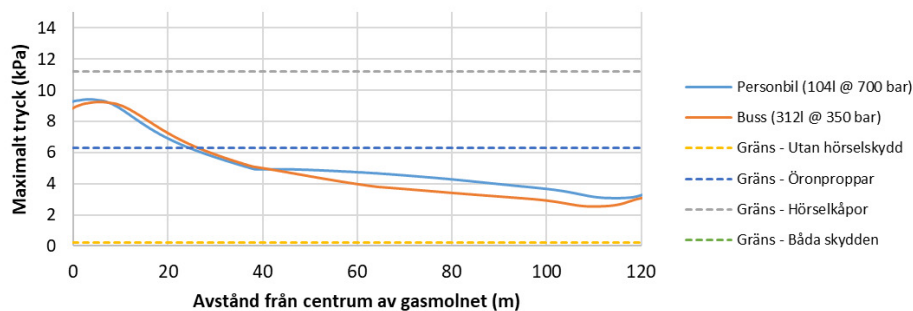
För sekundär explosion i det fria bedöms förekomsten av fordon vara mindre relevant eftersom tunneln inte på samma sätt stänger in de utsläppta gaserna i anslutning till fordonen. Därför har endast fallet utan fordon simulerats.

I likhet med fallet med gasexpansion så genomfördes beräkningar för såväl tät stadsbebyggelse (9 meter väg med höga byggnader vid sidorna) och helt öppet fält. Detta avsåg att rama in olika möjliga konfigurationer.

Figur 34. Maximalt tryck i tät stadsbebyggelse vid sekundär explosion av CNG



Figur 35. Maximalt tryck i tät stadsbebyggelse vid sekundär explosion av vätgas

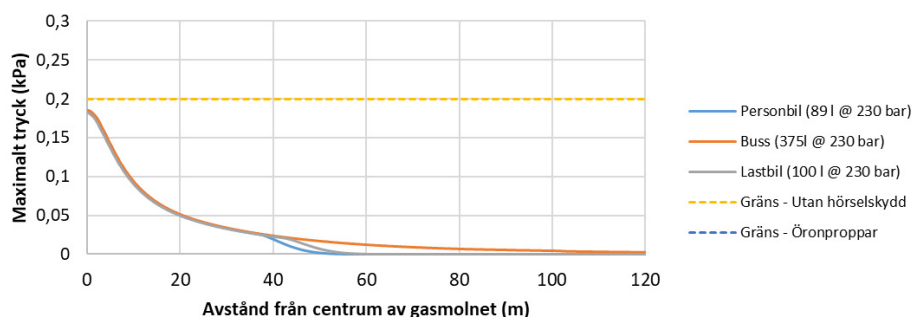


I likhet med ovan så sammanställs dessa resultat även i tabellform nedan. Ingen kontroll av risk för hjärnskador görs eftersom övertrycken är så låga att det inte finns någon data som indikerar detta.

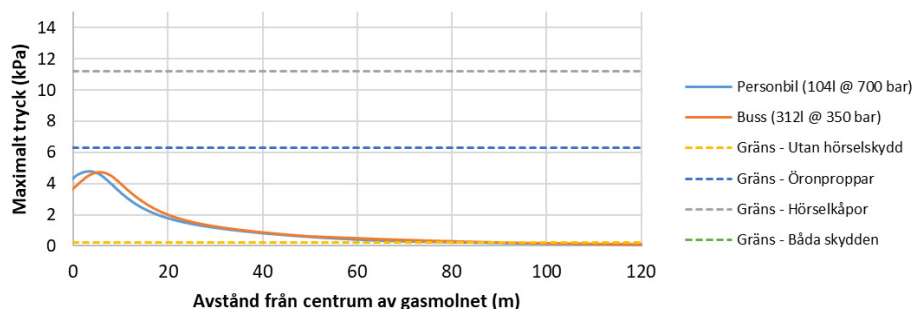
Tabell 15. Riskavstånd i tät stadsbebyggelse för sekundär explosion (observera dock eldklotsstorlek tidigare i detta kapitel). Notera att FLACS inte är validerat för den lägsta trycknivån.

Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	~20 m	0 m	0 m	0 m
	Buss	~20 m	0 m	0 m	0 m
	Lastbil	~20 m	0 m	0 m	0 m
Vätgas	Personbil	> 120 m	25 m	0 m	0 m
	Buss	> 120 m	28 m	0 m	0 m

Figur 36. Maximalt tryck i det fria där CNG exploderar som funktion av avstånd från centrum av gasmolnet



Figur 37. Maximalt tryck i det fria där vätgas exploderar som funktion av avstånd från centrum av gasmolnet



Detta medför riskavstånd för olika skydds nivåer enligt nedan.

Tabell 16. Riskavstånd i det fria för sekundär explosion (observera dock eldklotsstorlek tidigare i detta kapitel). Notera att FLACS inte är validerat för den lägsta trycknivån.

Bränsle	Fordon	Inget skydd	Hörselproppar	Hörselkåpor	Båda skydden
CNG	Personbil	~ 0 m	0 m	0 m	0 m
	Buss	~ 0 m	0 m	0 m	0 m
	Lastbil	~ 0 m	0 m	0 m	0 m
Vätgas	Personbil	~ 92 m	0 m	0 m	0 m
	Buss	~99 m	0 m	0 m	0 m

När det gäller fragmenteringen så är det mycket komplext fenomen eftersom det beror på storlek och aerodynamik hos fragmenten. Det finns beräkningsmetoder framtagna och presenteras t.ex. i CPR 14E (van Doormal and van Wees, 1996), men precisionen i resultaten är låg och ger mycket långa kastlängder. Om tankarna är placerad under fordonet (som normalt är fallet för personbilar) så är risken för primärsplitter (dvs. fragment från tanken) liten⁶. Det kan förekomma sekundärsplitter (splitter från andra delar av fordonet eller byggnader), men erfarenheten av dessa är att de tenderar att landa inom 50 meter från fordonet (se kap 4). Det kan dock inte uteslutas att sekundärsplitter (t.ex. glasfragment) dras med långa sträckor i tunnlar där tryckvågen kan transporteras långa sträckor.

För vertikala tankar eller tankar på tak så är risken för primärsplitter större och kastlängden betydligt längre vilket också framgår av erfarenheten från inträffade händelser. Det finns ett exempel på en händelse i Illinois i USA år 2015 där delar av tanken påträffades 400 m från händelsen. Denna händelse inträffade dock med en stående tank vilka kan få en 45 graders kastriktning medan liggande tankar normalt får maximalt 30 grader kastriktning vilket leder till en kortare kastlängd. Om en enkel beräkning avseende kastparabel görs så kan kastlängden vid 30 graders kastriktning beräknas enligt nedan.

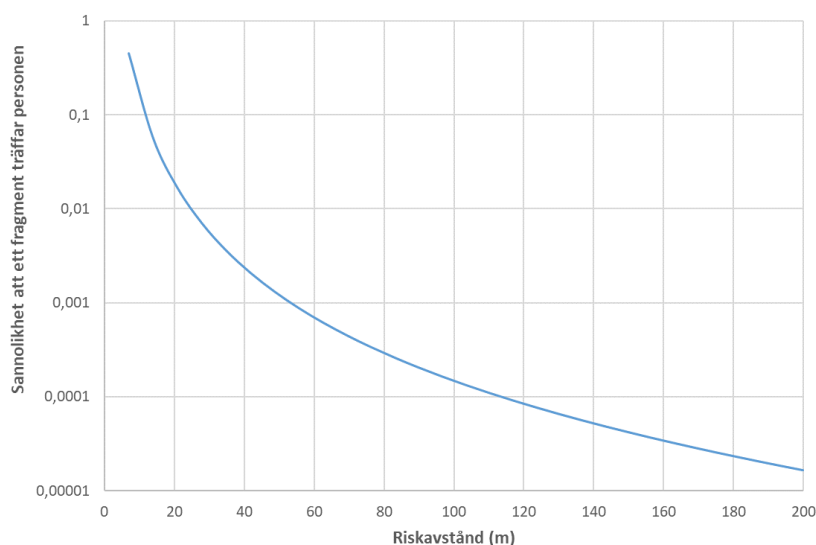
$$L = \frac{v_0 \sin(2\alpha)}{g}$$

Om denna ekvation används för att beräkna kastlängden vid 30 grader för samma hastighet som fallet i Illinois givet att denna var 45 grader så blir den 200 m. Det bör noteras att beräkningen inte tar hänsyn till luftmotståndet, men eftersom splitters medelhastighet är högre i det andra fallet så är denna förenkling konservativ.

6. Dessutom testas och godkänns tankar utifrån att de inte ska skapa primärsplitter. Dock har det inträffat i verkliga olyckor att primärsplitter har slungats iväg (t.ex. i Katrineholm 2016) så risken kan inte uteslutas.

Det bör också noteras att sannolikheten att träffas av ett fragment snabbt minskar med avståndet från fordonet. Om man försummar luftmotståndet så är vinkeln då fragmentet landar på marken lika stor som kastvinkeln och om man beaktar luftmotstånd är den större än kastvinkeln. Om man antar att vinkeln när den landar är lika stor som kastvinkeln, att alla vinklar 0-30 grader är lika sannolika och vidare antar att personen är 2 meter lång och 0,6 m bred så är sannolikheten att träffas av ett fragment vid olika avstånd enligt nedan.

Figur 38. Uppskattning av sannolikhet att träffas av fragment från tank vid olika avstånd från fordonet. Notera att skalan på y-axeln är logaritmisk.



Då framgår det att redan vid 50 meter avstånd så har risken minskat till ca 1 per 1'000 fragment och vid 100 meter är man nästan nere vid 1 per 10'000. Vilken risk som är acceptabel är alltid svårt att bedöma, men denna rapport antar att 1 per 1'000 rupturer är acceptabel för varm zon medan maximal kastlängd, 200-300 m, används för kall zon.

Det kan även noteras att små föremål ofta har en lägre rörelsemängd i förhållande till aerodynamisk storlek vilket gör att kastlängden ofta blir kortare vilket också kan noteras i sammanställningen i kapitel 4. Det gör att enklare skyddsutrustning mot mekanisk skada (t.ex. hjälm) sannolikt gör störst nytta i närheten av fordonet. Därför bör hjälm alltid användas i het och varm zon.

Vid ruptur av kolfibertankar så finns det även risk att kolfiberdamm frigörs. Detta har inte studerats i detalj, men identifierade källor tyder på att fibrerna förefaller vara för stora för att skada andningsvägarna (Vamp18, 2002). Ytterligare information om kolfibers riskbild vid räddningsinsats följer av MSBs pågående vägledningsarbete om kolfiberkompositier.

5.5 Scenario 3 – Läckage

Som beskrevs i riskidentifieringen i kapitel 5.1 så är ett relevant scenario att räddningstjänsten larmas ut till ett läckande fordon. Givet att man försäkrat sig om att inte träffas av en jetflamma från en värmeaktiverad tryckutjämningsanordning är det relevant att inte vistas i gasmolnet. Avstånd till den undre brännbarhetsgränsen redovisas i nedanstående tabell baserat på simuleringar i FLACS. Dessa har beräknats utan vind då det har visat sig vara konservativt (se kap 3.3 i Hagen et al. (2013)).

Tabell 17. Längd av det brännbara molnet 5 minuter efter läckage på gastank

Bränsletyp	Fordon	Dimensionerande källstyrka	Avstånd till LFL
CNG	Personbil	0,021 kg/s @ 230 bar	2,3 m
	Buss	0,087 kg/s @ 230 bar	3,4 m
	Lastbil	0,023 kg/s @ 230 bar	2,4 m
Vätgas	Personbil	0,014 kg/s @ 700 bar	4,7 m
	Buss	0,024 kg/s @ 350 bar	5,9 m

5.6 Scenario 4 – BLEVE (LNG)

Som tidigare har beskrivits så bedöms det mycket osannolikt att detta scenario skulle inträffa i en tunnel och därför beskrivs endast riskavståndet i det fria. Beräkningar återfinns i bilaga C där slutsatsen var att den begränsade mängden bränsle i gasfas vid en tankruptur innebär att strålningsdosen inte uppnår ett kritiskt värde på grund av den korta varaktigheten (ca 1,5 s) och därför anses riskavståndet uppgå till BLEVE-molnets radie oavsett om personen har skydd eller inte. Denna radie uppgår till 8 meter. Notera dock att detta avstånd kan öka i vindens riktning eftersom vinden kan dra med sig det brännbara molnet.

Eftersom LNG-tanken i det analyserade fallet är placerat under fordonet så kommer fordonet att begränsa risken för primärsplinter, men sekundärsplinter kan förekomma. Arbete i anslutning till tanken bör därför undvikas och sätt att oskadliggöra tanken på avstånd (t.ex. genom skjutning av tank) bör övervägas.

5.7 Sammanställning av resultat för gasformiga bränslen

Nedan sammanställs resultaten från beräkningarna i detta kapitel. Primär tryckvåg avser tryckvågen till följd av volymexpansionen av innehållet i tanken. Om innehållet sedan antänds omedelbart bildas ett eldklot och om det inte antänds direkt så finns det risk för att gasmolnet som bildas antänds i ett senare skede och med det avses sekundär explosion.

För jetflamma antas det att Personbil har en värmeaktiverad tryckutjämningsanordning med diameter 6 mm medan buss och lastbil har 8,5 mm. Det är osäkra mått, men anses rimligt konservativa skattningar utifrån tillgänglig information.

Tabell 18. Riskavstånd i tunnel. Notera att riskavståndet för person utan hörselskydd var längre än den simulerade domänen (300 m resp 120 m) i samtliga fall och redovisas därför ej.

Bränsle	Fordon	Jet (Skydd/ Inget skydd)	Tankruptur Primär tryckvåg (hörselpropp/ hörselkåpa/båda)	Eldklot (Inget skydd/ Skydd)	Sekundär explosion (hörselpropp/ hörselkåpa /båda)
CNG	Personbil	15 m / 20 m	196 m /36 m /5 m	14 m / 8 m	0 m / 0 m / 0 m
	Buss	19 m/ 25 m	>300 m />300 m / 40 m	45 m / 38 m	0 m / 0 m / 0 m
	Lastbil	19 m/ 25 m	264 m / 55 m / 10 m	16 m / 10 m	0 m / 0 m / 0 m
Vätgas	Personbil	20 m / 27 m	>300 m / 157 m / 20 m	10 m / 5 m	>> 120 m / >> 120 m / >> 120 m
	Buss	21 m / 28 m	> 300 m / 281 m / 30m	16 m / 10 m	>> 120 m / >> 120 m / >>120 m

Det kan konstateras att någon form av hörselskydd behövs alltid vid insats i tunnel. Vid insats mot personbil eller lastbil med CNG kan sannolikt hörselkåpa normalt ge tillräckligt skydd, men för övriga fall förefaller det som att båda krävs redan när man kör in i tunneln.

Nedanstående tabell innehåller motsvarande information för olycka i det fria. När det gäller eldklotet så visar beräkningarna att varaktigheten är för kort för att strålningen ska medföra skada och därför antas riskavståndet motsvara eldklotets storlek oavsett om personen har skydd eller inte.

Tabell 19. Riskavstånd i det fria (spannet avser olycka i det fria eller tät stadsbebyggelse). Notera att riskavståndet för person utan hörselskydd var längre än den simulerade domänen (200 m) i samtliga fall (förutom möjligen för personbil) och redovisas därför ej.

Bränsle	Fordon	Jet (Skydd/ Inget skydd)	Tankruptur Primär tryckvåg (hörselpropp/ hörselkåpa /båda)	Eldklot (Oberoende av skydd)	Sekundär explosion (Inget/hörselpropp/ hörselkåpa)
CNG	Personbil	15 m / 20 m	8-19 m/6-12 m/5 m	5 m	~ 0-20 m/ 0 m/ 0 m
	Buss	19 m/ 25 m	16-61 m/10-35 m/ 5-10 m	9 m	~ 0-20 m/ 0 m/ 0 m
	Lastbil	19 m/ 25 m	9-23 m/6-13 m/5 m	6 m	~ 0-20 m/ 0 m/ 0 m
Vätgas	Personbil	20 m / 27 m	13-46 m/8-18 m/5 m	5 m	~ 92 till > 120 m/ 0-25 m/ 0 m
	Buss	21 m / 28 m	16-58 m/10-33 m/5 m	6 m	> 120 m/ 0-28 m/ 0 m

Observera att ovanstående inte beaktar risken för splitter. Som diskuteras i kapitel 0 gör det att arbete inom 50 meter sannolikt bör undvikas vid risk för tankruptur om man inte har tillräcklig skyddsutrustning. Oskyddade personer bör hållas 200-300 m från fordonet för att risken att skadas av fragment ska hållas tillräckligt låg.

För läckage gäller nedanstående oavsett om händelsen inträffar i det fria eller i tunnel. Dock bör risken att antändningen av ett läckage snabbt aktiverar den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen beaktas vid val av taktik.

Tabell 20. Längd av det brännbara molnet 5 minuter efter läckage på gastank

Bränsletyp	Fordon	Avstånd till LFL
CNG	Personbil	2,3 m
	Buss	3,4 m
	Lastbil	2,4 m
Vätgas	Personbil	4,7 m
	Buss	5,9 m

För stumfyllnad av LNG är riskavståndet för påverkan av eldklotet 8 meter, men även för detta fall bör risken för splitter beaktas vid val av taktik. Eftersom situationen, i de fall räddningstjänsten blir inblandad, i de flesta fall är att betrakta som statisk så är det sannolikt bättre att välja en taktik som avvärjer hotet på avstånd (t.ex. skjutning av tank).



Underlag för zonindelning för fordon med batterier

6. Underlag för zonindelning för fordon med batterier

I detta kapitel görs en riskidentifiering samt beräkning av zonindelning för fordon med batterier.

6.1 Riskidentifiering för räddningspersonal

Om termisk rusning i batterier uppkommer utan att det brinner i fordonet så uppkommer det som första indikation på ett fel och därför kommer inte detta scenario vara relevant för räddningstjänsten även om det potentiellt kan ge stora konsekvenser (se Li (2018)).

Ett mer troligt scenario är att räddningstjänsten kommer på plats till ett brinnande elfordon och att batterierna påverkas av branden. När batterierna involveras i branden så produceras många olika ämnen varav flera saknar gränsvärden, men ett omtalat ämne som har en betydande toxisk påverkan är vätefluorid (HF) och LiJon-batterier kan producera upp till 200 mg HF per kWh (Larsson et al., 2017).

Vätefluoriden kan påverka brandmännen såväl vid inandning som via huden (NRC, 2004) och flera studier pågår för att undersöka denna påverkan närmare.

6.2 Beräkningar avseende toxisk påverkan

I en fransk studie (Lecocq et al., 2012) jämfördes effektutveckling och produktion av toxiska gaser hos fyra olika personbilar. Personbilarna var två olika modeller och för vardera modell testades både varianten med förbränningsmotor och den med batteri. Effektutvecklingen var liknande för de båda varianterna, men produktionen av vätefluorid varierade enligt nedan.

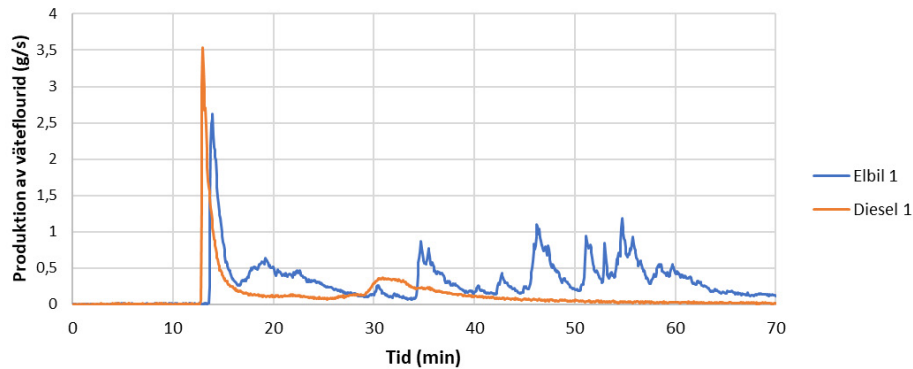
Tabell 21. Jämförelse mellan produktionen av vätefluorid hos elbil och bil med förbränningsmotor

Fordon	Förbränningsmotor	Elmotor	Skillnad
Personbil 1	621 g HF	1540 g HF	919 g (+148%)
Personbil 2	813 g HF	1470 g HF	657 g (+80%)

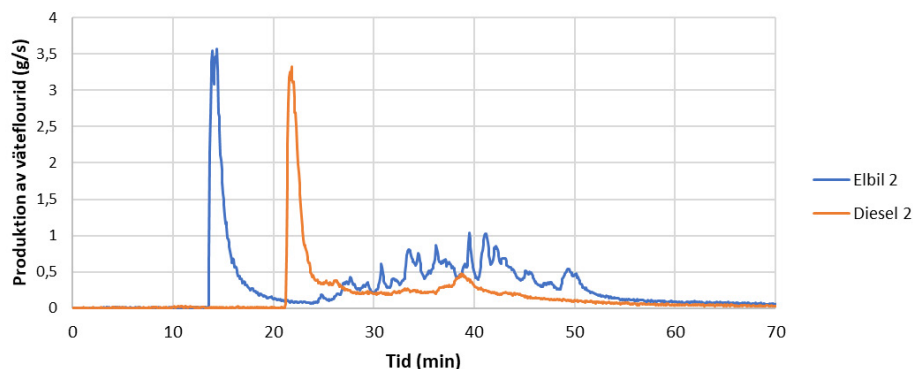
Analysen i detta kapitel utgår från rådata från ovanstående publikation som har erhållits från författarna till studien.

Produktionen av vätefluorid över tid för de fyra fordonen (två modeller och batteri/diesel) är enligt nedanstående figurer.

Figur 39. Produktion av vätefluorid över tid för modell 1 med el- respektive dieselmotor



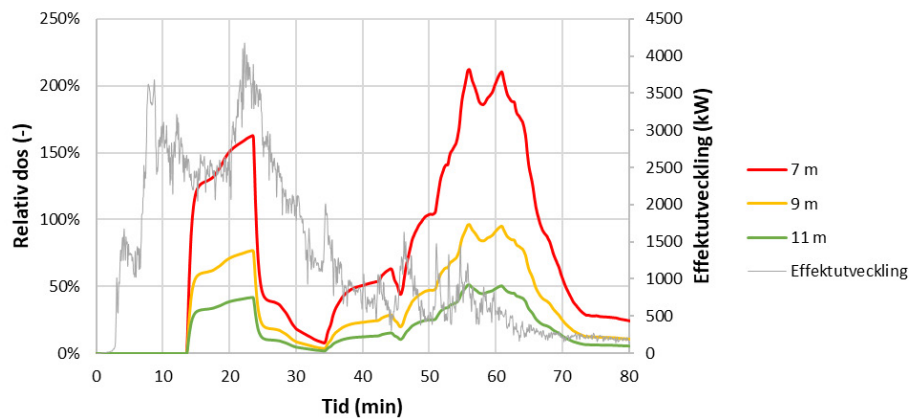
Figur 40. Produktion av vätefluorid över tid för modell 2 med el- respektive dieselmotor



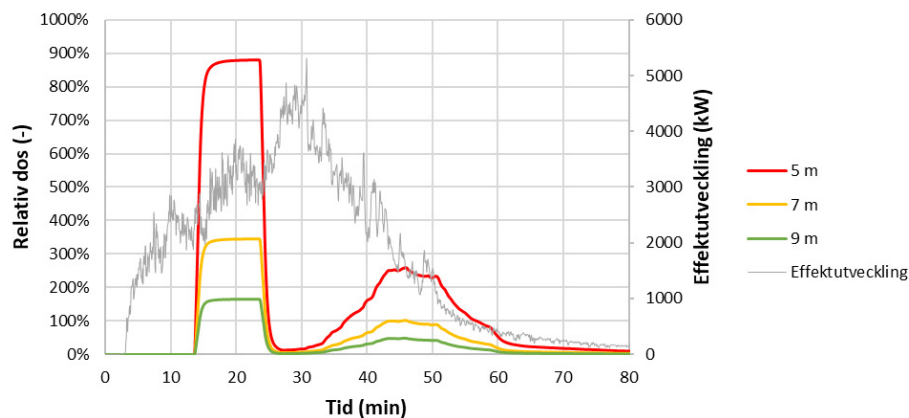
Som kan noteras från ovanstående diagram så producerar både dieseln och elbilen de högsta koncentrationerna av vätefluorid tidigt i brandförloppet vilket är då AC-vätskan i bilen involveras i branden. Denna produktion blir särskilt intressant eftersom den toxikologiska forskningen på vätefluorid har kommit fram till att dosen ska beräknas för koncentrationen i kvadrat (se kap 3.3) vilket gör att även en kortare period med hög koncentration kan ge en betydande dos.

Om man antar att brandmännen vid en insats riskerar att exponeras för röken i 5 minuter i samband med en släckinsats fås den relativa dosen enligt nedan. Den relativa dosen är den uppnådda dosen dividerat med den tolerabla dosen. Även effektutvecklingen för fordonet redovisas. De redovisade avstånden är valda så att den orangea linjen medför att dosen av vätefluorid från batteriet precis understiger den tolerabla dosen. Den röda och gröna linjen utgör en känslighetsanalys genom att avståndet varieras med ± 2 meter från den orangea linjen. Vid försök 2 överstigs den acceptabla dosen när AC-vätskan brinner, men eftersom den frågan är större än elbilar då de flesta fordon som brinner inte är elbilar så analyseras den inte närmare. Det bör dock undersökas i framtiden.

Figur 41. Dos av vätefluorid relativt skadlig dos för olika ankomsttider och avstånd från elfordonet. Baserat på 5 minuter exponering för brandrök. Data från försök 1 i Lecocq et al. (2012) risks pertaining to them have to be examined closely. Lithium-ion (Li-ion).



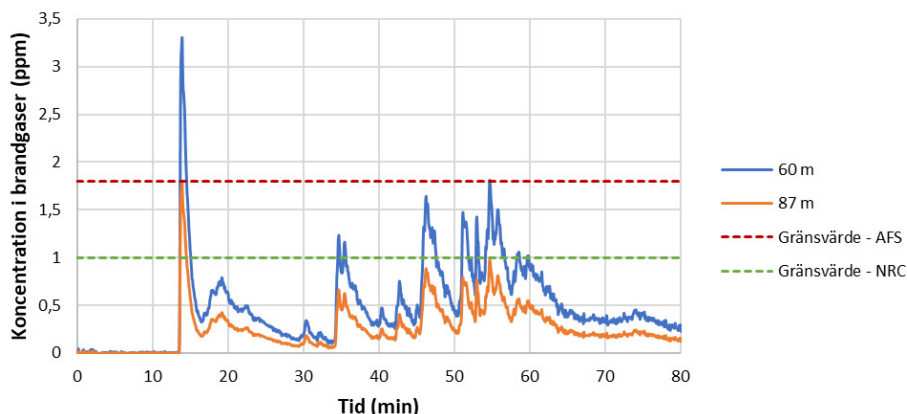
Figur 42. Dos av vätefluorid relativt skadlig dos för olika ankomsttider och avstånd från elfordonet. Baserat på 5 minuter exponering för brandrök. Data från försök 2 i Lecocq et al. (2012) risks pertaining to them have to be examined closely. Lithium-ion (Li-ion).



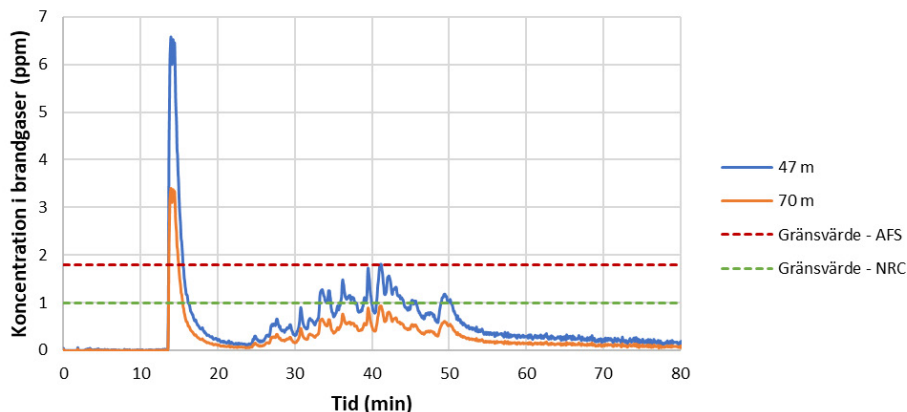
Resultaten indikerar att avståndet vid insats bör vara 7-9 meter. Det bör dock noteras att försöket ovan är baserat på fordon med en batterikapacitet på 16,5 respektive 23,5 kWh medan det idag finns bilar med 100 kWh. Eftersom, som nämndes ovan, emissionen av HF är proportionell mot lagrad energimängd så skulle avståndet behöva ökas.

När det gäller avstånd för oskyddad person så sätts gränsvärden så att inga symptom förväntas uppkomma. Det bör noteras att NRC (2004) inte rekommenderar dosvärden för lindrig påverkan utan att istället ett fast värde bör användas oavsett exponeringstid. I analysen används två alternativa gränsvärden. Det ena är nivågränsvärdet från AFS 2018:1 (Arbetsmiljöverket, 2018) som är 1,8 ppm och den andra är AEGL-1-gränsvärdet från NRC (2004) som är 1 ppm. Med motsvarande beräkning som ovan fås nedanstående riskavstånd.

Figur 43. Koncentration av vätefluorid i brandgaser på olika avstånd från elfordonet tillsammans med relevanta gränsvärden. Data från försök 1 i Lecocq et al. (2012).



Figur 44. Koncentration av vätefluorid i brandgaser på olika avstånd från elfordonet tillsammans med relevanta gränsvärden. Data från försök 2 i Lecocq et al. (2012).



Beräkning gjordes även i programmet ALOAH för ett kontinuerligt utsläpp på 1 g/s (vilket ungefär motsvarar det högsta värdet i Figur 30 och Figur 31) och en vind på 5 m/s (medelvinden i Malmö) och stabilitetsklass C. Resultaten visade på ett avstånd på 109 meter för 1 ppm och 81 meter för 1,8 ppm vilket är samma storleksordning som ovanstående.

Det kan noteras att dessa avstånd är extremt långa därför bör avspärningar sannolikt utgå från maximalt avstånd där plymen kan förväntas befinna sig givet den aktuella vinden.

Vid brand i personbil i tunnel kan det konstateras att för räddningstjänstens insats är avstånden i samma storleksordning som tunnelns bredd och därför kan ovanstående avstånd även antas vara relevanta för insats i en tunnel. När det gäller riskavstånd för oskyddade personer är det så långt att det inte är lämpligt att personer alls vistas i tunneln dit brandgaserna kan nå.

Inget motsvarande försök har kunnat identifieras för elbussar. Det finns ett försök från 2016 från RISE (Andersson et al., 2016), men där mättes endast temperaturer och vissa andra gaser (O_2 , CO_2 och CO). Det kan konstateras att det finns bussar med mycket stora batterier (upp mot 660 kWh (Proterra, 2016)),

men en genomgång av ett antal fabrikat som finns i trafik, eller planeras, i Sverige tyder på att den normala batteristorleken snarare är i storleksordningen 200-250 kWh för såväl nuvarande (Lundström et al., 2019) som planerade (Volvo, 2020) modeller. Troligen är bussen med det stora batteripaketet tänkt för långfärdsbussar vilket inte har diskuterats i Sverige. Detta gör att bussar har ca 2,5 ggr kapaciteten hos personbilen med det största batteriet. Effekttutvecklingen är emellertid också väsentligt mycket större och därför är det inte givet att riskavståndet behöver vara så mycket större. Det går dock inte att uttala sig om utan tillgång till relevant försöksdata.



Samman- ställning och förslag till zonindelning

7. Sammanställning och förslag till zonindelning

I nedanstående tabeller sammanställs riskavstånden för olika nivåer av skyddsutrustning. Observera att dessa avstånd inte beaktar risken för splitter.

Tabell 22. Riskavstånd vid brand i gasfordon i tunnel utan hänsyn till splitter. Notera att simuleringsprogramvaran inte är validerad för de låga trycken för kall zon vilket gör värdet mycket osäkert.

Bränsle	Fordon	Larmställ, hörselkåpa och -propp	Hörselkåpa	Hörselpropp	Oskyddad (Kall zon)
CNG	Personbil	15 m	36 m	196 m	>300 m
	Buss	40 m	> 300 m	> 300 m	>300 m
	Lastbil	19 m	55 m	264 m	>300 m
Vätgas	Personbil	>> 120 m	>> 120 m	> 300 m	>300 m
	Buss	>> 120 m	>> 120 m	> 300 m	>300 m

Tabell 23. Riskavstånd vid brand i gasfordon i det fria (spann avser skillnad mellan öppen plats och tät stadsbebyggelse) utan hänsyn till splitter. Notera att simuleringsprogramvaran inte är validerad för de låga trycken för kall zon vilket gör värdet mycket osäkert.

Bränsle	Fordon	Larmställ och dubbla hörselskydd	Hörselkåpa	Hörselpropp	Oskyddad (Kall zon)
CNG	Personbil	15 m	15 m	15 – 19 m	≥200 m
	Buss	19 m	19 – 35 m	19 – 61 m	> 200
	Lastbil	19 m	19 m	19 – 23 m	> 200
Vätgas	Personbil	28 m	28 m	28 – 46 m	> 200
	Buss	26 m	26 – 33 m	26 – 58 m	> 200

De långa riskavstånden för vätgas i tunnel är i stor utsträckning beroende på risk för lindrig hjärnskada till följd av den stora impulsen trots att tryckökningen är relativt begränsad. Kunskapsnivån kring detta är dock begränsad och därmed kan riskavståndet eventuellt minskas genom en ökad kunskapsutveckling inom området.

Som diskuterats i kapitel 5.4 är splitter en mycket komplex fråga. Om tanken befinner sig i underredet på fordonet (som t.ex. är vanligt för personbilar och lastbilar) så är risken för primärsplitter mycket låg. Däremot kan det förväntas

att sekundärsplitter från fordonet kan förekomma. Dessa har emellertid normalt mindre rörelseenergi och lägre kastlängd (normalt under 50 m) och därför blir det inte dimensionerande för avstånd till oskyddade personer. Brandmän med full skyddsutrustning bör vara mer skyddade från sekundärsplittret, men de bör sannolikt ändå bara undantagsvis visats närmare fordonet än 50 meter. I tunnlar ökar sannolikheten att fragment träffar väggar där de studsar och tappar stor del av sin rörelseenergi, men å andra sidan kan tryckvågen transporteras långt och luftrörelsen riskerar att accelerera fragment som istället ökar kastlängden hos sekundärsplitter.

Fordon med tankar på tak (t.ex. de flesta bussar) medför en betydande högre risk för primärsplitter (se t.ex. kap 4) och även sekundärsplitter förekommer (inte minst från kapslingen av tankarna). Kastlängden på primärsplittret kan ofta vara flera hundra meter vilket gör att allmänheten och andra oskyddade personer sannolikt bör hållas minst 200-300 m från olyckan. Finns behov av att göra en aktiv räddningsinsats blir acceptabelt avstånd en fråga om acceptabel risk. Om man antar att det vore acceptabelt med en risk på 1 av 1000 att träffas av ett fragment så blir riskavståndet 50 meter.

Vid en insats mot fordon som läcker finns det risk för ett brännbart gasmoln inom ca 5 meter från fordonet. Det finns dock en risk att antändningen av gasmolnet leder till att en värmeaktiverad tryckutjämningsanordning löser ut och därför bör man vid en insats även förhålla sig till de avstånden i ovanstående tabell.

Vid insats mot stumfylld LNG-tank finns det risk att drabbas av termisk påverkan inom ca 8 meter från fordonet. Notera dock att detta avståndet kan öka i vindens riktning eftersom vinden kan dra med sig det brännbara molnet. I det analyserade fallet är LNG-tanken placerad i fordonets underrede vilket minskar risken för primärsplitter enligt ovan. Det kvarstår dock en risk för sekundärsplitter även om den är mindre än den för CNG på grund av de lägre trycken. Arbete i anslutning till tanken bör därför undvikas och sätt att oskadliggöra tanken på avstånd (t.ex. genom skjutning av tank) bör övervägas.

När det gäller insatser mot bilar med batterier indikerar beräkningarna att ett riskavstånd på 7-9 meter är nödvändigt för räddningstjänsten. Notera dock att försöken gjordes på bilar med förhållandevis små batterier (16,5-23,5 kWh) jämfört med många bilar idag som kan ha uppemot 100 kWh. Det bör dock noteras att i de aktuella försöken så medförde förbränningen av AC-vätskan en större risk för skadlig exponering av vätefluorid än batterierna så det är inte nödvändigtvis så att ett större skyddsavstånd krävs för elbilar än för bilar med förbränningsmotor. För att koncentrationen ska bli så låg att person utan skyddsutrustning ska få en tolerabel dos blir riskavståndet mycket stort (upp mot 100 meter) och därför bör man sannolikt istället fokusera på att de är placerade så att de inte riskerar att hamna i brandplymen.

När det gäller bussar med batterier har inga experiment med tillräckliga mätningar för att identifiera riskavstånd identifierats i litteraturen. Det kan dock konstateras att de bussar som finns, eller planeras, på de svenska vägarna har batterikapaciteter på ca 200-250 kWh vilket sannolikt är lägre i förhållande till förväntad effektutveckling än för personbilar.



**Behov av
vidare studier**

8. Behov av vidare studier

Innevarande rapport utgör en översikt över riskavstånd vid räddningsinsatser mot fordon med alternativa fordon. Förutom att fortsätta med mer detaljerade analyser inom respektive område i denna rapport (se kap 1.3) finns det även ett antal studier som är angelägna för att öka kunskapen och minska osäkerheten. Ett urval av dessa redovisas nedan för respektive område.

Jetflamnor

- Kartlägga ekvivalent area i värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar från olika fordon på marknaden.

Tankrupturer

- Undersöka påverkan på människor av händelser med lågt maxtryck, men hög impuls.
- Undersöka om det finns en koppling mellan den termodynamiska expansionen och eldklotet för vätgas.
- Experimentell undersökning av tryckvåg i tunnel.
- Validering av resultaten med hjälp av andra modeller.
- Undersökning av hörselpåverkan, t.ex. med AHAH-metoden, vid tankruptur.
- Systematisk genomgång av litteraturen om splitterbildning och splitterdistribution.

LNG

- Under vilka förutsättningar kan en BLEVE uppkomma

Batterier

- Finns det risk för betydande jetflamnor och gasmolnexplosioner och i så fall under vilka förutsättningar?
- Fler fullskaleförsök (inklusive bussar) där såväl effektutveckling som produktion av vätefluorid över tid mäts samt ev. koncentrationen i plymen på olika avstånd.

Referenser

- Andersson, P., Brandt, J., Willstrand, O., 2016. Full scale fire-test of an electric hybrid bus, SP Report 2016:05.
- Arbetsmiljöverket, 2018. Hygieniska gränsvärden. AFS 2018:1, Arbetsmiljöverkets författningssamling.
- Berger, E.H., 2001. Extra Protection: Wearing Earmuffs and Earplugs in Combination. *Audiol. Online* August 6.
- Berghmans, J., Vanierschot, M., 2014. Safety aspects of CNG cars. *Procedia Eng.* 84, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.407>
- Boverket, 2013. Boverkets ändring av verkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (BBRAD3).
- Bowen, L.G., Fletcher, E.R., Richmond, D.R., 1968. Estimate on man's tolerance to the direct effects of air blast. Report DASA 2113, Headquarters Defense Atomic Support Agency.
- Courtney, M.W., Courtney, A.C., 2011. Working toward exposure thresholds for blast-induced traumatic brain injury: thoracic and acceleration mechanisms. *Neuroimage* 54, 55–61.
- D.G., C., 1946. Structural Defence. UK Ministry of Home Security, Civil Defence Research Committee paper RC 450.
- Danielsson, U., 1984. Människans fysiska tålighet vid brand. Värmeupplagring - brännskada. FOA Rapport C 54055-H1.
- Dhurandher, B.K., Kumar, R., Dhiman, A., 2015. Impact Assessment of Thermal Radiation Hazard from LPG Fireball. *Procedia Earth Planet. Sci.* 11, 499–506. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.050>
- Drysdale, D., 1998. *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Gehandler, J., Lönnermark, A., 2019. CNG vehicle containers exposed to local fires. Rapport 2019:120_rev1, Borås:RISE.
- Gelbe, D., 2020. Personlig kommunikation 2020-06-03.
- Gexcon, 2019. FLACS v10.9 User's Manual. Gexcon AS.
- Hagen, J.-T., Ichard, M., Muthusamy, D., Fuglestad, A.-L., 2013. Modelling of consequences of several releases of gaseous, liquefied and liquid flammable substances. Gexcon.13-F45822-RA-1.
- Johansson, M., Laine, L., 2012. Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning Del 1: Last av luftstötväg.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Mellander, B.E., 2017. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Sci. Rep.* 7, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z>

- Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G., 2012. Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle . Int. Conf. Fires Veh. 183–194.
- Li, Y.Z., 2018. Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels. RISE, Brandforsk 2018:1.
- Lundström, A., Holmström, M.N., Torstensson, E., 2019. Elbussar i Sveriges kollektivtrafik Skånetrafiken och Västtrafik utifrån fyra perspektiv. Trafikverket.
- Madrzykowski, D., 2017. Fire Fighter Equipment Operational Environment: Evaluation of Thermal Conditions. Res. NFPA Mission 90.
- Molkov, V., 2012. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering, Comprehensive Renewable Energy. University of Ulster. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00418-2>
- Montelius, J., 2005. Vetenskapligt Underlag för Hygieniska Gränsvärden 26. Nr 2005:16, Arbetslivsinstitutet.
- NRC, 2004. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. National Research Council, Washington DC. <https://doi.org/10.17226/10902>
- Persson, H., 1990. Basutrustning för skumsläckning - Försöksresultat och rekommendationer som underlag för dimensionering och utförande.
- Proterra, 2016. Catalyst: 40 foot Bus - Specifications [WWW Document]. URL <https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2016/08/Proterra-Catalyst-Vehicle-Specs.pdf> (accessed 6.19.20).
- Purser, D., McAllister, J., 2016. Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat, in: Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall, J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Torero, J.L., Watts, J.M., Wieczorek, C.J. (Eds.), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York, NY: Springer Publications, pp. 2308–2428.
- Purser, D.A., 2000. Toxic product yields and hazard assessment for fully enclosed design fires. Polym. Int. 49, 1232–1255. [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200010\)49:10<1232::AID-PI543>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200010)49:10<1232::AID-PI543>3.0.CO;2-T)
- Rutter, B., 2019. Pressure versus impulse graph for blast-induced traumatic brain injury and correlation to observable blast injuries. Missouri University.
- Stenius, C., Nordström, J., Svensson, J., Olsén, M., 2020. Räddningsinsatser vid olyckor med gasfordon - En omvärldsanalys av metodik och olyckor 2016-2019. MSB1510.
- Svensson, L., 2015. Människans tålighet mot luftstövågor. FOI-R--3905--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut.
- Trafikanalys, 2020. Fordon 2019 [WWW Document]. URL <https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/> (accessed 6.19.20).
- United Nations, 2014. UN Vehicle Regulations Addenda to the 1958 Agreement. Addendum 109: Regulation No.110.

- Vamp18, 2002. Arbetsmiljön vid användning av kolfiberkompositer [WWW Document]. URL <http://web1.mtov.lth.se/vamp18/pdf/BC/koldammbuller.pdf> (accessed 6.19.20).
- van Doormal, J.C.A., van Wees, R.M.M., 1996. Rupture of vessels, in: van den Bosh, C.J.H., Weterings, R.A.P.A. (Eds.), CPR 14E, Methods for the Calculation of Physical Effects. Gevaarlijke stoffen, pp. 138–147.
- Volvo, 2020. Volvo 7900 Electric [WWW Document]. URL <https://www.volvobuses.se/content/dam/volvo/volvo-buses/markets/sweden/sv-se/buses/Data-sheet-7900-Electric-SE-2019.pdf> (accessed 6.19.20).
- Wingfors, H., Fredman, A., Thunell, M., 2019. Brandskyddskläders skyddskapacitet- materialtester med kemikalier som bildas vid bränder och termisk rusning i Li-jon batterier Faktaruta. MSB1350.
- Zalosh, R., Weyandt, N., 2005. Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test. SAE Technical Paper 2005-01-1886.

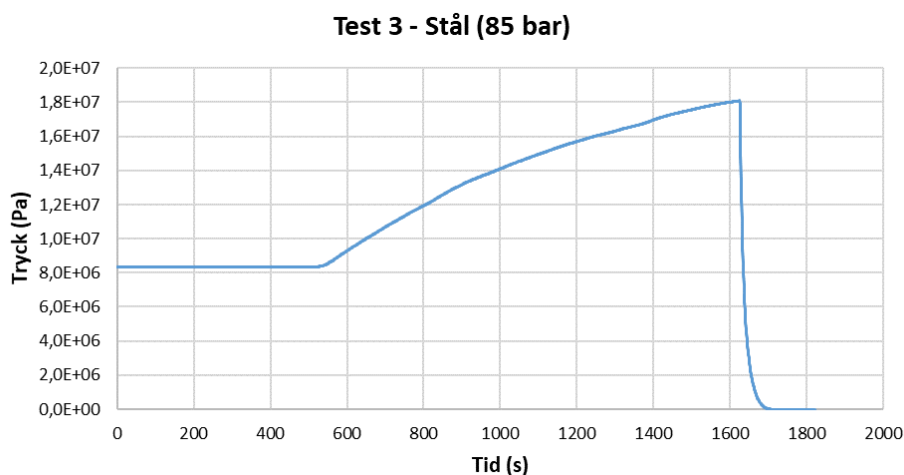
| Bilaga A

Bilaga A – Beräkning av storlek på värmeaktiverad tryckutjämningsanordning för personbil

För att hantera bristen på information om storlekar på värmeaktiverade tryckutjämningsanordningar användes resultat från experiment i ett tidigare projekt som bistod med rådata (Gehandler and Lönnermark, 2019). I försöken värmdes tankarna upp genom en brand till dess en jetflamma bildades eller en ruptur inträffade.

Beräkningarna baserades på att temperaturen i gasen beräknades genom kännedom om utgångstemperaturen samt hela tryckhistoriken.

Figur 45. Tryck i ståltank som funktion av tiden vid uppvärmning med pölbrand

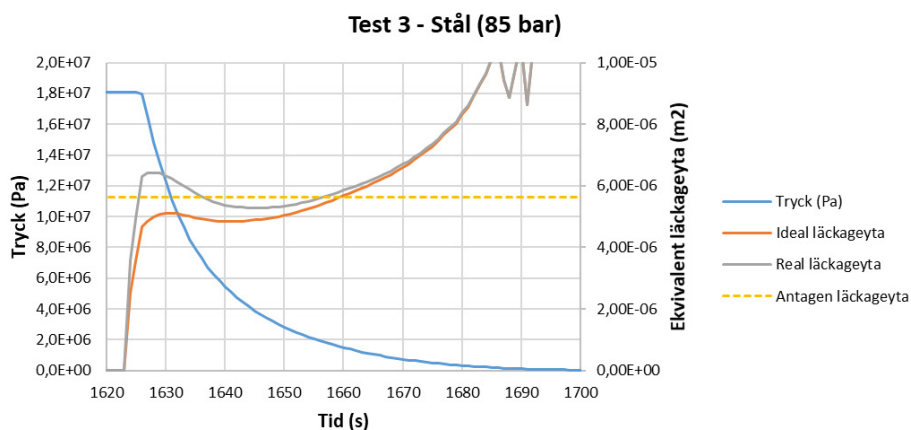


Eftersom uppvärmningen går förhållandevis långsamt i förhållande till tömnings-tiden så bortsågs från värmeutbytet under tömningsfasen vilket gjorde att massutflödet kunde beräknas från tryckhistoriken och denna översattes sedan till en ekvivalent effektiv area genom dels ideala gaslagen och dels reala gaslagen enligt Abel-Noble sambandet nedan (Molkov, 2012).

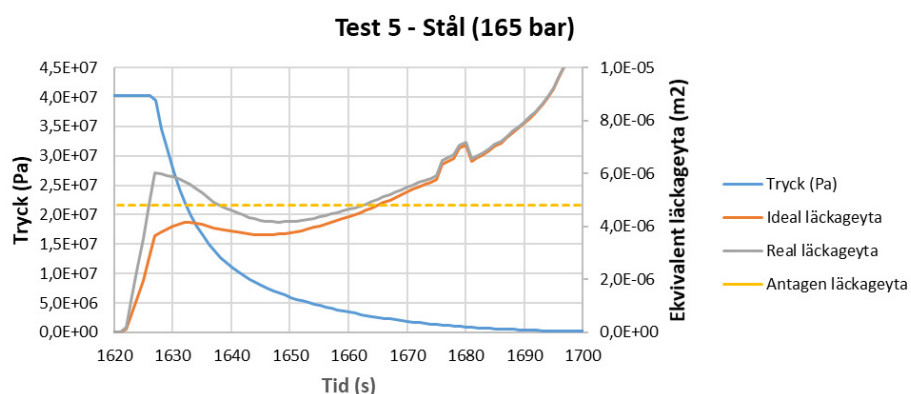
$$p = Z \cdot \rho \cdot R_{CH_4} \cdot T$$
$$Z = 1 + \frac{7,69 \cdot 10^{-3} \cdot p}{R_{CH_4} \cdot T}$$

Resultatet framgår av nedanstående figurer för de tre undersökta fall i Gerhandler och Lönnermark (2019) där mätningar gjordes, ingen ruptur eller läckage inträffade. Steckad linje markerar ett medelvärde för den reala läckageytan under den period som bedömdes vara relevant.

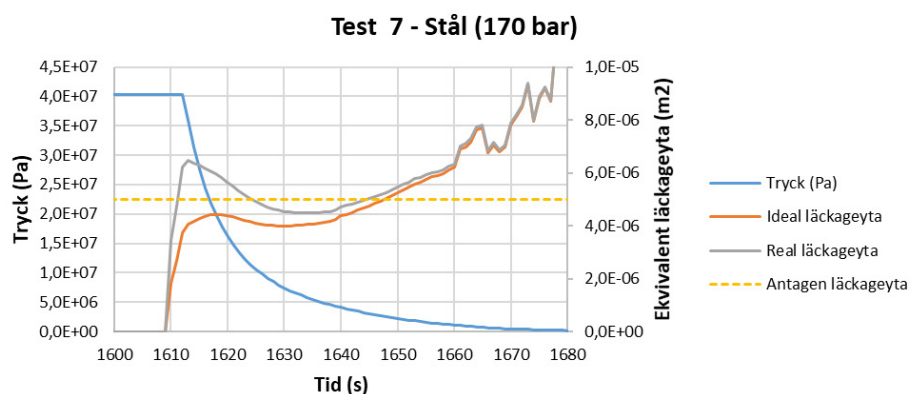
Figur 46. Tryck i stältank och ekvivalent läckageyta genom den värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen för test 3



Figur 47. Tryck i stältank och ekvivalent läckageyta genom värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen för test 5



Figur 48. Tryck i stältank och ekvivalent läckageyta genom värmeaktiverade tryckutjämningsanordningen för test 7



Resultatet sammanställs i nedanstående tabell.

Tabell 24. Sammanställning av beräknad läckagediameter

Fall	Real (effektiv) läckagediameter (mm)	Real läckagediameter (vid $C_d=0,85$)
3	2,68	3,15
5	2,47	2,91
7	2,52	2,96
Medel	2,56	3,00

Som framgår av Tabell 24 så stämmer resultatet förhållandevis väl mellan de olika försöken. Detta är därmed en möjlig metod för att beräkna den ekvivalenta läckageytan när trycket i en tank loggas i samband med en jetflamma.

| Bilaga B

Bilaga B – Beräkningar avseende eldklot vid tankruptur (CNG/Vätgas)

Eldklotets diameter är en funktion av massan gas som släpps ut och det finns flera olika samband (av samma typ) i litteraturen. I detta kapitel används sambandet från CPR 14E (van Doormal and van Wees, 1996) nedan.

$$D_{max} = 5.8m_f^{1/3}$$

I ekvationen är D_{max} eldklotets maximala diameter och m_f är massan bränsle i kg. Li (2018) vidareutvecklade modellen för tunnlar och presenterade nedanstående samband.

$$L_{max} = 102 \frac{m_f}{A}$$

I ovanstående samband är A tunnelns tvärsnittsarea i m^2 .

Som Li (2018) påpekar så är det oklart om instängningseffekterna i en tunnel kan göra att flamfronten accelererar över tid och därmed kan skapa betydande övertryck (till skillnad från eldklot i det fria), men detta har inte analyserats närmare inom ramen för denna studie.

Tabell 25. Eldklotets storlek för olika fordon och bränslen

Bränsletyp	Fordon	Storlek i det fria (radie)	Storlek i tunnel (från fordon)
CNG	Personbil	5 m	8 m
	Buss	9 m	33 m
	Lastbil	6 m	8 m
Vätgas	Personbil	5 m	5 m
	Buss	6 m	9 m

Beräkningar av infallande strålning motsvarande de i bilaga C har utförts och på grund av den begränsade massan i tankarna (som medför kort varaktighet) uppnås ingen kritisk strålning i marknivå för ruptur i det fria. Riskavståndet kan därmed antas vara eldklotets radie.

För fallet i tunnel, också det beräknat på samma sätt som i bilaga C, uppnås kritisk strålning 0-5 meter från eldklotet för skyddad person och 5-12 m för oskyddad. Eldklotets storlek för de olika studerande fallen framgår i nedanstående tabell.

Tabell 26. Eldklotets storlek för olika fordon och bränslen

Bränsletyp	Fordon	Riskavstånd i det fria (Oskyddad/skyddad)	Riskavstånd i tunnel (Oskyddad/skyddad)
CNG	Personbil	5 m / 5 m	14 m / 8 m
	Buss	9 m / 9 m	45 m / 38 m
	Lastbil	6 m / 6 m	16 m / 10 m
Vätgas	Personbil	5 m / 5 m	10 m / 5 m
	Buss	6 m	16 m / 10 m

| Bilaga C

Bilaga C – Beräkningar avseende BLEVE

Scenariot i detta fall är en stumfyllning av LNG-tanken så att den brister. Beräkningsgången följer den som finns beskriven i Annex, men värdet på koefficienterna i ekvationen för diameter och varaktighet är hämtade från Betteridge och Philips (2015). Anledningen var att dessa varierar mellan källor och experimenten i denna studie ansågs bäst representera aktuell studie eftersom de var baserade på LNG.

Andelen som är tillgänglig för en eventuell explosion är den så kallade flash-andelen som kan beräknas enligt nedan.

$$f = 1 - \exp\left(-2,63 \frac{C_p}{H_v} (T_c - T_b) \cdot \left(1 - \left(\frac{T_c - T_0}{T_c - T_b}\right)^{0,38}\right)\right)$$

I ekvationen är C_p specifik värme vid konstant tryck (2,17 kJ/kgK), H_v är förångningsentalpi (510,83 kJ/kg), T_c är den kritiska temperaturen (191 K), T_b är kokpunkten vid 1 atm (111 K) och T_0 är temperaturen i vätskan (143K vid 12 bar). Notera att värmeutbyte med omgivningen försummas.

Detta medför att ca 15% av massan LNG i tanken förångas. Den största tanken är, enligt kap X, 550 l och densiteten för LNG är 450 kg/m³ (ref). Detta medför att det kan finnas 248 kg LNG i tanken då den är stumfylld. Den massan som förångas vid BLEVE:n är då ca 36 kg.

Beräkning av riskavstånd för strålning från BLEVE i det fria

Det finns många samband i litteraturen mellan eldklotets storlek och den inblandade massan av formen $D=aM^b$, men ofta är de baserade på få datapunkter (van Doormal and van Wees, 1996). En sådan studie, som även har inkluderat LNG, är Betteridge och Phillips (2015) och där förefaller $a=4,8$ och $b=1/3$ ge en bra passform för data. Detta ger följande diameter på eldklotet om massan som deltar i BLEVE:n är m kg.

$$D = 4,8m^{1/3} = 4,8 \cdot 36,1^{1/3} = 16m$$

Varaktigheten kan beräknas med ett liknande samband (notera dock att uttrycket i artikeln är felaktigt med en faktor 10).

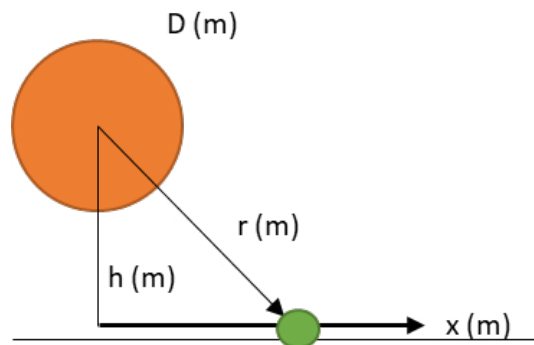
$$t = 0,45m^{1/3} = 0,45 \cdot 36,1^{1/3} = 1,5 s$$

För att kunna beräkna strålningsdosen behövs ett samband för höjden och då har nedanstående ekvation befunnits ge en förhållandevis god överensstämmelse med försök.

$$h = 0,75D = 0,75 \cdot 16 = 12 \text{ m}$$

Avståndet från en person som vistas x meter från fordonet blir då r meter enligt nedanstående figur.

Figur 49. Avstånd till eldklot



Där avståndet r beräknas enligt nedanstående ekvation.

$$r = \sqrt{h^2 + x^2}$$

Avgiven strålning per yta antas vara 200 kW/m² enligt allmän rekommendation i källan och synfaktorn F, beräknas enligt nedan.

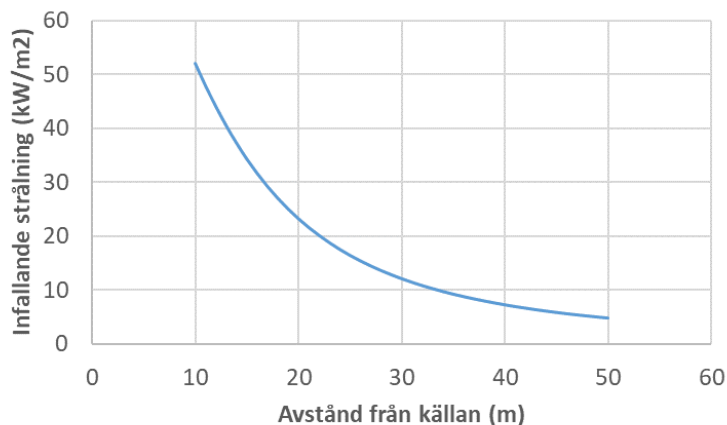
$$F = \frac{D^2}{4r^2} = \frac{D^2}{4(h^2 + x^2)} = \frac{16^2}{4(12^2 + x^2)}$$

Om vi bortser från absorption av strålning i luften så är infallande strålning enligt nedan.

$$\dot{q}'' = F \cdot \bar{E}$$

Vilket får nedanstående utseende om man plottar mot avstånd från källan.

Figur 50. Infallande strålning från eldklot som funktion av avstånd till källan



För att få riskavstånd så beaktades strålningen, men eftersom varaktigheten är kort så översattes kriterierna i kapitel 3.2 till en strålning som gav motsvarande dos där dosen är definierad enligt nedan.

$$Q = t \cdot (\dot{q})^{4/3}$$

För oskyddad person medför det att en maximal dos på $5130000 \text{ W}^{4/3}/\text{m}^8/3\text{s}$ kan accepteras. Om det jämförs med doserna i Dhurandher et al. (2015) så framgår det att denna dosen motsvarar ca 7% sannolikhet för första gradens brännskador vilket kan vara rimligt som skadekriterium.

Om varaktigheten tas som samma som eldklotets varaktighet (1,5 s) så blir den kritiska strålningsnivån $80 \text{ kW}/\text{m}^2$ och med en skyddsfaktor på 4 enligt tidigare skulle en strålning på upp till $320 \text{ kW}/\text{m}^2$ kunna accepteras för personer med skydd. När eldklotet väl etablerats så kommer inte någon av dessa strålningsnivåer uppnås i marknivå och därför kommer eldklotets radie vara dimensionerande för riskavståndet för såväl skyddade som oskyddade personer vilken uppgår till 8 meter enligt ovan. Orsaken till detta är den mycket korta varaktigheten vilket gör att effekten kan liknas vid en sk flash-fire i gasmoln som primärt anses kunna skada de som befinner sig i molnet.

Beräkning av riskavstånd för strålning från BLEVE i tunnel

För beräkning av riskavstånd i tunnel används samband framtagen av Li (2018) enligt nedan, men anpassad till koefficienterna i den ekvation som användes för beräkning av diameter av eldklotet.

$$L_{max} = 58 \frac{m}{A} = 58 \frac{36}{9 \cdot 4,5} = 52 \text{ m}$$

$$X_{max} = \frac{L_{max}}{2} = 26 \text{ m}$$

Det bör noteras att detta samband är mycket känsligt för koefficienterna i ekvationen för klottediameter eftersom faktorn framför kvoten är en funktion av diametern på det ekvivalenta eldklotet i kubik (dvs upphöjt till tre). I den ekvation som användes i Li:s rapport var koefficienten 5,8 istället för de 4,8 som användes ovan och då hade riskavståndet ovan ökat från 26 meter till 45 meter vilket illustrerar osäkerheten i beräkningen.

Li (2018) presenterar inget samband för varaktighet i tunnlar, men parallellt med beräkningen för klottediameter ovan kan ett samband för varaktighet beräknas om man antar motsvarande förbränningshastighet per ytenhet.

$$t_{tunnel} = 16,3 \frac{m_f}{A} = 14,5 \text{ s}$$

Den skadliga strålningsdosen är motsvarande som för eldklot i det fria och det gör att den kritiska strålningen för en oskyddad person kan beräknas enligt nedan.

$$\dot{q}''_{krit,oskyddad} = \left(\frac{Q_{Dos,krit}}{t_{tunnel}} \right)^{3/4} = \left(\frac{5130000}{14,5} \right)^{3/4} = 14,5 \text{ kW/m}^2$$

Om en skyddsfaktor på 4 antas på samma sätt som tidigare så accepteras 58 kW/m² för personer med skyddsutrustning.

Om beräkning enligt metoden för platta till punkt (Drysdale, 1998) används och hela tvärsnittet bedöms täckas av flammor och personen befinner sig mitt på tunneln bredd och på 2 meters höjd så erhålls kritisk strålning vid 13 meter från flammen för oskyddade personer och 6 meter vid skyddade.

Detta innebär ett riskavstånd på 32 meter för skyddade personer och 39 meter för oskyddade.

| Bilaga D

Bilaga D – Indata till simuleringar i FLACS

I denna bilaga presenteras indata till FLACS för de olika scenarierna för att ge möjlighet att återskapa simuleringarna som denna rapport baseras på.

Tabell 27. Jetflamma

	Variabel	Värde	Kommentar
Domain	XLO	-10 m	
	XHI	60 m	
	YLO	-8 m	
	YHI	8 m	
	ZLO	-3 m	
	ZHI	15 m	Varierade något mellan simuleringar för att säkerställa att det inte påverkade resultaten.
Grid	X	0,75 m	
	Y	0,75 m	Förfinades med Jet-modellen i FLACS.
	Z	0,75 m	Förfinades med Jet-modellen i FLACS.
Simulation control	tsim	10 s	
	CFLC	10	
	CFLV	1	
Boundary conditions	XLO	Wind (+X, 5 m/s)	
	XHI	Nozzle	
	YLO	Wind (+X, 5 m/s)	
	YHI	Wind (+X, 5 m/s)	
	ZLO	Nozzle	
	ZHI	Wind (+X, 5 m/s)	
Leak	Position	0, 0, 0	
	Jet model	Ewan-Moodie	
	Diameter	Se kap 0	Varierade mellan fordon.
	Pressure	Se kap 0	Varierade mellan fordon.

	Variabel	Värde	Kommentar
Ignition	Ign time	0,5 s	
Radiation	Model	DTM	Användes nära källan.
	Frequency	100	
	Angles	48	
	Emissivity	0,85	
	Cutoff	10 kW/m ²	
	Far-field	true	

Tabell 28. Tankruptur – Gasexpansion

	Variabel	Värde	Kommentar
Domain	XLO	0 m	
	XHI	300 m	
	YLO	-4.5 m	
	YHI	4.5 m	
	ZLO	0 m	
	ZHI	4.5 m	
Grid	X	0.5 m → 1 m	Ökades succesivt från X=50 (max stretch 1,1).
	Y	0.5 m	
	Z	0.5 m	
Simulation control	tsim	2 s	
	CFLC	0.03	
	CFLV	0.03	
	Time step control	KEEP_LOW	För att hindra att tidsteget ökar med tiden.
Boundary conditions	XLO	Symmetry	Symmetriplan för att minska beräkningstiden.
	Other	Plane Wave	
Initial conditions	Wind	0 m/s	
	Temp	20°C	
	Ground roughness	0.0002 m	

Setup file**Understruket värde varierade mellan simuleringar (se kap 2)**

VERSION 1.1

\$SETUP

KEYS = "PS1=01,P_SET=Y:5.8464,T_SET=Y:293"

\$END

\$PARAMETERS

PFAC = 1

HPPOS = 0, -0.75, 1.5

HPSIZ = 1.5, 1.5, 1.5

HPEXP = 2, 2, 2

HPTYP = 0, 1, 1

\$END

Tabell 29. Tankruptur – Gasexplosion

	Variabel	Värde	Kommentar
Domain	XLO	0 m	
	XHI	300 m	
	YLO	-4.5 m	
	YHI	4.5 m	
	ZLO	0 m	
	ZHI	4.5 m	
Geometry	-	-	3D modell av olika fordon skapades (se framsida för exempel).
Grid	X	0.5 m	
	Y	0.5 m	
	Z	0.5 m	
Simulation control	tsim	5 s	
	CFLC	5	
	CFLV	0.5	
	Time step control	KEEP_LOW	För att hindra att tidsteget ökar med tiden.
Boundary conditions	All	Plane Wave	
Initial conditions	Wind	0 m/s	
	Temp	20°C	
	Ground roughness	0,5 m	
Fuel region	Pos	160, 0, 0.3	Placering som bedömdes ge högst tryck.
	Size (Y, Z)	4 m	Anpassades till geometrin.
	Size (X)	Varierades	Beräknades för att ge korrekt storlek på stökiometriskt moln för aktuellt fordon (från 6,2 m till 26,3 m).
	Volume fraction	Methane=1 eller Hydrogen=1	Beroende på typ av fordon.
	Equivalence ratio	1.05	Marginellt fet blandning ger normalt högre tryck.
Ignition	Time	0.1 s	
	Location	Mitt i molnet	

Tabell 30. Läckage

	Variabel	Värde	Kommentar
Domain	XLO	-1 m	
	XHI	4 m	
	YLO	-1 m	
	YHI	1 m	
	ZLO	-1 m	
	ZHI	1 m	
Grid	X	0.2 m	
	Y	0.2 m	Förfinades med Jet-modellen i FLACS.
	Z	0.2 m	Förfinades med Jet-modellen i FLACS.
Simulation control	tsim	10 s	
	CFLC	25	
	CFLV	0.5	
Boundary conditions	All	Nozzle	
Leak	Position	0, 0, 0	
	Jet model	Ewan-Moodie	
	Source strength	Se kap 5.5	Varierade mellan fordon.
	Pressure	Se kap 5.5	Varierade mellan fordon.
Ignition	–	None	



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap