



Risker med nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage

Jonatan Gehandler, Peter Karlsson & Lotta Vylund



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut



Jonatan Gehandler, Peter Karlsson & Lotta Vylund

Abstract

Risks with alternative fuels in road tunnels and underground garage

Due to environmental concern, policy goals for transportation aim at using renewable fuels. These include gaseous fuels such as motor gas, methane or hydrogen and electric vehicles. This research project focuses on a literature review to understand the emerging risks with alternative propellants in road tunnels and underground garages. Gaseous fuels and electric vehicles pose new risks compared to the liquid fuels that we are more used to. In particular this concerns gaseous fuels and the risk for pressure vessel explosion, and the release of toxic substances such as hydrogen fluoride from Li-ion batteries undergoing thermal runaway. Two workshops were organized to get feedback from stakeholders and to initiate discussions. Future research, risk reducing measures, rescue service guidance and changes of regulation and guidelines are discussed and proposed.

Key words: road tunnel, underground garage, alternative fuels, explosion, electric vehicles, gaseous fuels.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Arbetsrapport 2016:84
ISBN 978-91-88349-72-9
ISSN 0284-5172
Borås

Foto på framsidan: Brandförsök med parkerade bilar, Magnus Arvidsson, SP Safety

Innehållsförteckning

Abstract 3

Innehållsförteckning	4
Sammanfattning	6
1 Inledning	8
1.1 Mål och syfte	8
1.2 Läsanvisning	9
2 Räddningsinsatser under mark	10
3 Energibärare och dess risker	12
3.1 Antändlighet	13
3.2 Explosion	14
3.2.1 Explosioner i slutna utrymmen	16
3.2.2 Gasers beteende i slutna utrymmen	18
3.3 Konventionella drivmedel (bensin och diesel)	19
3.3.1 Bensin	19
3.3.1.1 Fordonsrelaterade scenarier	19
3.3.2 Diesel	20
3.3.2.1 Fordonsrelaterade scenarier	20
3.4 Gasformiga drivmedel	20
3.4.1 Metan	21
3.4.1.1 Fordonsrelaterade scenarier för komprimerad metan (CNG)	22
3.4.1.2 Fordonsrelaterade scenarier för flytande metan (LNG)	23
3.4.2 Dimetyleter och motorgas	24
3.4.2.1 Fordonsrelaterade scenarier för dimetyleter och motorgas	25
3.4.3 Vätgas	26
3.4.3.1 Fordonsrelaterade scenarier	27
3.5 Elfordon och hybrider	28
3.5.1 Battericellens uppbyggnad	28
3.5.2 Batterisystemets säkerhetsfunktioner	28
3.5.3 Batterikemi Li-jon	29
3.5.4 Termisk rusning	29
3.5.4.1 Bekämpa termisk rusning	30
3.5.4.2 Ventilerade gaser	30
3.5.5 Fordonsrelaterade scenarier	33
3.6 Garage under mark	34
3.7 Vägtunnlar	36
4 Säkerhetsåtgärder	39
4.1 Garage under mark	39
4.2 Vägtunnlar	40
4.3 Fordon	41
4.4 Räddningsinsats	42
4.4.1 Räddningsinsats mot ett elfordon	42
4.4.2 Räddningsinsats mot ett gasfordon	43
5 Diskussion	45
6 Rekommendationer och framtida forskning	47
6.1 Säkra gastankar på fordon	48
6.2 Säkra garage under mark	48
6.3 Riktlinjer och framtida forskning för räddningstjänst	48
7 Referenser	49

Förord

Nordiskt vägforum (NVF) har finansierat denna kunskapsöversikt och slutrapport genom projektet *Nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage*. Projektet har pågått under 2016 och har anordnat två workshops, en om garage och en om vägtunnlar dit intressenter bjöds in till diskussion. Projektet har också samverkat med ett Norskt projekt på samma tema, *El- og gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom*. Rapporten har granskats internt av professor Anders Lönnermark.

Sammanfattning

I framtiden kan vi vänta oss att en allt större andel vägfordon drivs med fossiloberoende drivmedel. För att undvika onödiga överraskningar och olyckor, i och med en sådan förändring inom transportsektorn, krävs att regler och praxis ligger steget före så att olyckor kan förebyggas innan de sker. Projektet är finansierat av Nordiskt Vägforum och syftar till att inventera och uppdatera kunskapsläget för nya energibärare, att ge riktlinjer för räddningstjänsts agerande och att ge rekommendationer för utformandet av regler. Vägtunnlar och underjordiska garage är speciellt riskfyllda utrymmen för brand och explosion. Projektet har fokuserat på kommersiella gasformiga drivmedel (gasol, DME, metan och vätgas) och eldrift. Sverige har störst erfarenhet av fordon med metangas, även kallat fordonsgas. I Norge, och på senare tid även i Sverige, har antalet elfordon ökat lavinartat. Risker med nya energibärare skall dock inte överdrivas, alla fordonsbränslen innebär någon form av brand- eller explosionsrisk. Jämfört med vätskeformiga drivmedel introducerar dessa nya drivmedel dock nya risker såsom tryckkärlsexplosion, BLEVE och termisk rusning.

Elfordon har som allra minst en del av sina energibärare i form av ett batteri. Vanligast på marknaden idag och inom en överskådlig framtid är Li-jon-baserade teknologier. Den energi som frigörs vid förbränning av ett batteri är i förhållande till resten av fordonet måttlig och innebär relativt en bensintank generellt sett en lägre brandbelastning. För att förhindra batterihaverier som följd av såväl yttre påverkan som interna fel är batterierna utrustade med tekniska säkerhetssystem. Om skadorna ändå leder till för höga temperaturer i batteriet eller intern kortslutning kan batteriet haverera och försättas i termisk rusning.

Brandbelastningen från ett elfordon är alltså inte värre än från fordon med mer konventionella energibärare men de innebär andra risker. Elsystemet till traktionsbatteriet måste beaktas vid räddningsinsats, särskilt när en bil står på laddning, men innebär med rätt information ingen väsentlig riskökning. Vid en termisk rusning produceras dock en hel del gaser som dels kan vara brandfarliga och dels kan vara mycket giftiga. Om den termiska rusningen sker i samband med brand bör inte dessa gaser förvärra problemet eftersom brandröken redan idag är giftig, men om ingen brand uppstår kan stora mängder giftig gas som HF produceras utan att faran uppmärksammas.

En brand i ett batteri är mycket svårsläckt, dels för att det ofta är väl skyddat, dels för att det krävs väldigt mycket kylning för att stoppa en termisk rusning. Därför bör brandbekämpning av ett elfordon fokusera på att släcka branden runt om batteriet och förhindra brandspridning från det. Li-jon-batterierna medför också ett problem med att om de skadats så kan de mer än ett dygn efter skadan starta eller återuppta en termisk rusning. Den termiska rusningen kan då leda till återantändning eller att en ny brand startar.

En av de största farorna med elfordon idag är sannolikt inte tekniken och de möjliga konsekvenserna utan snarare osäkerheten kring hur de skall hanteras. Tekniken är förhållandevis ny och skiljer sig från konventionella energibärare. Detta kan leda till en osäkerhet vid räddningsinsats och på så sätt innebära högre risker.

Enligt europeiska riktlinjer ska gastankar inspekteras periodiskt. Detta följs inte alls idag i Sverige. Gastankarna utsätts för en korrosiv miljö och försvagade tankar har påvisats och även exploderat. Exponeringen från en verklig brand kan skilja sig markant från den brand som gastankar provas mot enligt provningsstandard. Tillsammans gör de här faktorerna att en tryckkärlsexplosion vid en fordonsbrand är ett relativt rimligt scenario. Tanken försvagas när den värms upp samtidigt som trycket ökar p.g.a. den uppvärmda gasen. Om inte säkerhetsventilen hinner lösa ut kan det resultera i en explosion med

dödlig utgång i närområdet. Sker den i ett garage under mark kan ovanliggande våningar riskera att rasa. En vägtunnel däremot väntas stå emot tryck av den här storleksordningen utan problem eftersom den dels har kraftigare konstruktion och dels är den inte sluten utan tryckavlastning kan ske i bägge ändarna.

Även om det är svårt att veta vilka typer av drivmedel som kommer att dominera i framtiden behöver regelverk anpassas med god framförhållning för att hinna påverka utformningen av garage som sedan används flera decennier framöver. Lagkrav och standarder behöver utarbetas på ett tidigt stadium för att både styra och stödja detta utvecklingsarbete. Regelverk för garage tar idag ingen hänsyn till fordons energibärare (lokala regler kan finnas). Restriktioner som idag finns i andra länder skiljer sig åt vilket gör att de kan ifrågasättas. Riskerna behöver förstås och värderas för att införa bra regler i ett tidigt skede.

Ett antal riskreducerande åtgärder har identifierats och föreslagits. De mest effektiva åtgärderna bedöms vara: förbättra standard för brandprov av gastankar och periodiska besiktningar för fordonsgastankar i Sverige. Det bör även undersökas att ställa krav på ett visst brandmotstånd av fordonsgastankar och på sprinkler i publika garage under mark. Behovsstyrd ventilation utgår idag från avgaser från diesel och bensinfordon, den behöver anpassas till de gaser som kan väntas i framtiden, t.ex. vätgas, metangas och vätefluorid.

Baserat på den information och studier som har sammanställts bedöms riskökningen för tunnlar från gasfordon vara försumbar. Svenska vägtunnlar med longitudinell ventilation bedöms vara robusta mot introducerade explosionsrisker. En större gasmolnsexplosion är högst osannolik. En tryckkärlsexplosion eller BLEVE är troligast efter brand. Då kan det väntas att de flesta har utrymt från närområdet. En vägtunnel bedöms vara robust mot sådana explosioner.

En annan viktig fråga är räddningstjänstens insatser med hänsyn till de nya faror som kan uppstå med fordon som drivs av nya energibärare. Det råder idag en stor osäkerhet kring hur räddningstjänst ska hantera brand i gasfordon. Bränder i tunnlar och parkeringsgarage under mark kan redan idag vara en stor utmaning för räddningstjänst. Gasfordon har gastankar som kan explodera eller skapa en jetflamma när säkerhetsventiler löser ut. En byggnadskollaps som följd av en explosion kan inte uteslutas och bör studeras ytterligare. Det bör även undersökas hur brandmän bäst kan skydda sig från giftiga brandgaser dels från vanliga fordon, dels från elfordon.

1 Inledning

I framtiden kan vi vänta oss att alla vägfordon drivs med fossiloberoende drivmedel. För att undvika onödiga överraskningar och olyckor i och med en sådan förändring för transportsektorn, krävs att regler och praxis ligger steget före så att olyckor kan förebyggas innan de sker. Vägtunnlar och underjordiska garage är speciellt riskfyllda utrymmen för brand och explosion.

Transportsektorn genomgår för närvarande stora förändringar i samband med den succesiva övergången till ett mer fossiloberoende samhälle. Svenska regeringen har visionen om ett Sverige utan nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären 2050 samt en prioritering om en fossiloberoende fordonsflotta 2030 som kan ses som ett steg på vägen (prop. 2008/09:162). Flera nya energibärare för fordon har införts och ännu fler är på väg in. Dessa nya energibärare kan ibland innebära nya typer av risker, vilka behöver kunna hanteras i samhället. Det är viktigt att ständigt värdera säkerheten i förändrade system så att regelverk och praxis kan uppdateras innan stora olyckor sker.

Generellt sett kan sägas att fordonsbränslen i de flesta fall innebär någon form av brand- eller explosionsrisk. Flytande bränslen, som bensin, samt brännbara gaser kan antändas och börja brinna vid ett eventuellt läckage. Explosiva blandningar med luft kan bildas. Risker med fordonsbränslen skall dock inte överdrivas. Med tanke på den omfattning som fordon används så kan man konstatera att det sker förhållandevis få olyckor där bränslet haft en större inverkan på förloppet eller konsekvenserna. Bidragande orsaker till detta är att vi har en mycket lång tradition av fordonsutveckling samt också ett omfattande regelverk både vad det gäller fordonens konstruktion och dess användning.

Vad som är viktigt när ett nytt fordonsbränsle skall introduceras är att förstå hur det aktuella bränslet uppför sig i olika situationer och utifrån det konstruera fordon, tankstationer m.m. samt även skapa säkra hanteringsrutiner. Lagkrav och standarder behöver utarbetas på ett tidigt stadium för att både styra och stödja detta utvecklingsarbete. Detta gäller inte minst vägtunnlar och underjordiska garage som på grund av sin omslutande konstruktion innebär en speciellt riskfylld miljö vid brand, explosion eller gasutsläpp. Regelverk för konstruktion av tunnlar och garage tar idag ingen hänsyn till fordons energibärare (lokala regler kan finnas för garage). Restriktioner som idag finns i andra länder skiljer sig vilket gör att de kan ifrågasättas. Riskerna behöver förstås och värderas för att införa bra regler från början.

En annan viktig fråga är räddningstjänstens insatser med hänsyn till de nya risker som kan uppstå vid en brand eller olycka med fordon som drivs av nya energibärare. Till exempel kan gastankar explodera eller skapa en jetflamma när säkerhetsventiler utlöser på grund av ökat tryck vid brand.

1.1 Mål och syfte

Rapporten syftar till att inventera och uppdatera kunskapsläget för nya energibärare för fordon i tunnlar och garage. Rapporten har som delmål att ta fram lärdommar, kunskap och statistik över inträffade olyckor för fordon med nya energibärare.

Viktiga brand- och explosionsrelaterade frågor med anknytning till nya energibärare kommer att kartläggas. Områden där det behövs ytterligare undersökningar eller utveckling av nya verktyg för prevention och behandling av brandscenarier kommer att beskrivas. Målsättningen är att ta fram underlag för myndigheter och transportsektor med vägledning för hur dessa risker ska hanteras i framtida garage och tunnelsystem. Regler och praxis för konstruktion av tunnlar och garage kommer att undersökas.

Riktlinjer kommer att undersökas för räddningstjänsten i samband med släckning av fordon drivna med nya energibärare.

Studien avser de nya energibärare som används kommersiellt i Sverige, det vill säga åtminstone en tankstation som kan användas av gemene man. Utöver det skall drivmedlet antingen uppföra sig annorlunda eller så skall det finnas osäkerheter kring drivmedlets brand- eller explosionsrisk, jämfört med konventionella drivmedel.

1.2 Läsanvisning

Kapitel två ger en överblick över räddningsinsatser under mark vid brand. Kapitel 3 är ett omfattande kapitel om risker med nya energibärare. Kapitlet fokuserar på teori om gaser och explosioner, risker med elbatterier samt risker med dessa fordon i underjordiska garage och vägtunnlar. Kapitel fyra och fem kan läsas fristående och ger en sammanfattning av de viktigaste riskerna med nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage samt diskussion kring möjliga riskreducerande åtgärder. I kapitel 6 ges rekommendationer för regler och behov av framtida forskning.

2 Räddningsinsatser under mark

Det krävs oftast en icke-konventionell taktik och metodik för räddningsinsatser i undermarksanläggningar. Projektet ”Taktik och Metodik i Undermarksanläggningar (TMU)” har tagit fram rekommendationer vid insatser i olika typer av undermarksanläggningar, i första hand vägtunnlar, spårtunnlar, gruvor och underjordiska garage. Rekommendationerna bygger dels på utförda insatsförsök i en tunnel och dels på tidigare forskningsprojekt och erfarenheter från verkliga händelser. Detta kapitel ger en översiktlig beskrivning av de rekommendationer som finns i rapporten ”Rekommendationer för räddningsinsatser i undermarksanläggningar” (Lönnermark et al., 2015).

En undermarksanläggning innebär en annan riskbild än en byggnad ovan mark. Med avseende på utrymningsituation är ofta gångavstånden längre och miljön obekant, vilket innebär att människor kan behöva hjälp att utrymma. Insatsen är ofta utbredd på ett större geografisk område, till exempel kan det vara flera kilometer mellan två tunnelöppningar. Det går heller inte att se förloppet och det innebär svårigheter med att få en lägesbild över olycksförloppet. Räddningstjänsten är dessutom inte lika bekant med geometrin i anläggningen vid jämförelse med lägenhetsbrand.

Själva brandförloppet i en undermarksanläggning kan också antas skilja sig från en byggnad ovan mark. Det är oftast omfattande och snabb rökspridning och brandens storlek och strålningsvärme kan också påverka räddningstjänstens möjlighet att använda släckmedel. Det uppstår ofta ett behov av extra materiella resurser i form av andningsluft, extra slang, mobila fläktar etc.

Särskilda faktorer som måste tas hänsyn till i en undermarksanläggning är:

- Tillgång till angrepps- och utrymningsvägar från och till en säker miljö.
- Omgivande ytor.
- Särskilda risker i form av högspänning, schakt m.m.
- Släcksystem.
- Antal människor och var de befinner sig.
- Tekniska installationer och deras styrning och övervakning.
- Ras eller spjälkning i värmepåverkade tunneldelar.
- Högspänning eller brandfarlig vätska, gas.
- Pågående trafik på spårrområde eller vägbana.

Den taktik och metodik som rekommenderas är att vara väl förberedd. Eftersom igenkänningsfaktorn är begränsad är det viktigt med ett enkelt och intränat koncept för att få en effektiv insats. Insatser i undermarksanläggningar är resurskrävande och därför bör det finnas ett särskilt befäl som ansvarar för att resurser finns på plats. Resurser i det här fallet består både av personella resurser och material som tillgång till luft och andra förbrukningsmaterial. Vid framkomst till skadeplatsen är den primära taktiken att underlätta för självevakering genom att skapa rökfri miljö med god sikt. Endast om livräddande insats bara kan genomföras genom att först släcka branden ska brandsläckning genomföras först.

Valet av angreppsväg är extra viktigt vid en undermarksanläggning eftersom anläggningar ofta är stora och komplexa. Räddningstjänsten bör eftersträva att så långt som möjligt undvika att transportera sig i rökfylld miljö. Svårigheten är dock att veta var branden är utan att gå ner i anläggningen. När det inte finns risk för övertändning eller överraskas av en brand kan en rekogniseringsstyrka gå ner som en första insats. Styrkan har som mål att skapa sig en lägesbild av olyckan och hjälpa till med evakuering. De ska

inte släcka några bränder och kan då färdas snabbare än rökdykare som behöver bygga upp ett slangsystem med säkert vatten. Rekogniseringsstyrkan kan förses med en lyslina, dels för att själva snabbt hitta tillbaka, dels för att hjälpa utrymmande människor att hitta ut.

Vid val av hur räddningstjänsten taktiskt skall använda sig av ventilation beaktas om det är i en tunnel eller i ett parkeringsgarage. Bränder i tunnlar är inte bränslekontrollerade och därför innebär det ingen risk att ventileras. Det är positivt att gå in med vinden i ryggen för att minska risken för inträngning i rökfylld miljö. Problemet är dock att räddningstjänsten fläktar ofta är för klena för större anläggningar. Ett annat problem är placeringen av fläktar eftersom bullret från dem kan påverka kommunikationen och därmed insatsen negativt. I en tunnel är det också viktigt att vara försiktig med ventilation så att det inte befinner sig människor dit man riktar luftflödet. I garage kan branden vara ventilationskontrollerad vilket innebär att brandförloppet kan öka kraftigt vid ventilering och tillförsel av syre. Det är också viktigt att i förväg kontrollera var frånluften finns så att inte rök trycks ut i till exempel trapphus.

Ytterligare rekommendationer från projektet var att försöka förenkla rutinerna så mycket som möjligt genom att ha förberedda ihopkopplade slangar. Vid långa inträngningsvägar är det också positivt att bära lätt, till exempel tomt slangsystem, bärsele och transportvagn. Transportvagnen var tänkt att underlätta genom att slippa ägna kraft åt att bära extra luft och slangar och istället ha utrustningen på en vagn med hjul. Det visade sig dock att det krävs mycket övning innan för att den ska vara ett effektivt hjälpmedel. Värmekameran var ett viktigt hjälpmedel, men här krävs också övning för att kunna använda den på ett effektivt sätt vid små temperaturskillnader som det kan vara i en tunnel eller i ett parkeringsgarage. Det var också negativt att bära värmekameran med handen och därför bör det undersökas om värmekameran kan bäras på hjälmen. Användning av syrgas istället för komprimerad luft i flaskpaketen var också ett förslag för att öka aktionstiden. Denna möjlighet bör dock undersökas vidare innan den implementeras.

Figur 1 visar en bild från ett av de storskaliga försöken som genomfördes i samband med TMU-projektet. Rekommendationerna kan läsas i sin helhet i (Lönnermark et al., 2015). I rapporten finns också referenser till projektets övriga rapporter.



Figur 1 Storskaligt insatsförsök i TMU, foto Per Rohlén.

3 Energibärare och dess risker

I detta kapitel introduceras olika alternativa energibärare och risker med dessa ur ett brand- och explosionsperspektiv. Vägtunnlar och underjordiska garage är byggnadsverk. I plan- och bygglagen fastställs att ett byggnadsverk ska ha de tekniska egenskaper som är väsentliga ifråga om bl. a. säkerhet vid användning (SFS, 2010:900).

I plan- och byggförfordning fastställs bland annat att ett byggnadsverk ska vara projekterat och utfört på sådant ett sätt att byggnadsverkets bärförmåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid, personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt, hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand, och att risken för skador av explosioner är acceptabel (SFS, 2011:338). Kapitlet avslutar med en bedömning av riskerna med alternativa drivedel i underjordiska garage respektive vägtunnlar.

Enligt Statens offentliga utredning om fossilfri fordonstrafik (SOU 2013:84) finns det en stor potential för fossiloberoende drivmedel både inom och utanför Sverige. Det är dock svårt att veta vilka drivmedel som kommer att användas för transport och vilka som kommer att användas inom andra områden. I slutändan är det betalningsvilja och marknader som styr, påverkade av politiska styrmedel. Rapporten bedömer att vägtrafiken kommer kunna se ut som i Tabell 1 nedan jämfört med år 2010. Vad som är klart är att en betydande ökning av alternativa drivmedel är att vänta. Dock är det svårt att säga vilka som blir stora. En kombination av flera olika drivmedel är ett mer troligt framtida scenario än något eller några få (Lönnermark, 2014). E85 var det bränsle som fick störst genomslag av biobränslen efter lansering 2005, men mängden etanol som säljs har sjunkit sedan 2012. En tydlig trend under senare år är att bensin minskar medan diesel ökar i popularitet¹. Detta talar för DME eller ED95 snarare än för E85 och metanol, om trenden att gå över till dieselmotorer håller i sig. Det är dock svårare för dieselmotorer att uppnå de allt tuffare avgaskraven som ställs. Under senare år har försäljningen av elfordon ökat lavinartat både i Sverige¹ och Norge (Reitan et al., 2016). Batterier skulle kunna bli en dominerande framtida energibärare om trenden håller i sig.

Tabell 1 Prognos över andelen förnybara bränslen år 2030 och 2050 jämfört med år 2010 (SOU 2013:84).

Drivmedel	Prognos 2030	Prognos 2050
El	3-14%	19-45%
Biodrivmedel	32-65%	55-?%
Fossila bränslen	65-21%	26-0%

De vanligaste energibärarna har hittills varit vätskeformiga drivmedel med bensin och diesel som de i särklass mest dominerande. Eftersom bensin är ett mycket brandfarligt och lättflyktigt drivmedel så erbjuder alternativa vätskeformiga drivmedel såsom etanol, metanol och biodiesel ingen förhöjd risk utan snarare en reducerad riskbild (Machiele, 1990). Dessa kommer därför inte att studeras i detalj. Ett fordon som framdrivs av en s.k. bränslecell omvandlar t.ex. vätgas eller metanol till elenergi med hjälp av en kemisk process. Det är alltså ingen förbränningsmotor även om de drivmedel som ofta används också finns eller fungerar i förbränningsmotorer. Den här studien fokuserar på kommersiella drivmedel och dess förvaring oavsett hur energin utvinns.

Gasformiga drivmedel hanteras under tryck och medför en annan riskbild än vätskeformiga drivmedel. De gasformiga drivmedel som identifierats som kommersiella i Sverige är Dimetyleter (DME), flytande petroleum gas (LPG), metan i form av komprimerad gas (CNG) och som kryogas (LNG), 'N' står egentligen för naturgas, men används här för metangas oavsett ursprung (naturgas/biogas), samt vätgas.

¹ Svenska Petroleum och Biodrivmedel Institutet: www.spbi.se, SCB: <http://www.scb.se/sv>.

En annan grupp av fordon och energibärare är elfordon och hybrider som helt eller delvis framdrivs av lagrad elenergi i batterier. Elfordon beter sig annorlunda vid brand och kan släppa ut gaser vid termisk rusning. Elfordon är intressanta för studien, inte minst eftersom det kan väntas att de kommer att laddas i garage under mark. Detta medför en risk för elfel och brand.

3.1 Antändlighet

De fysikaliska parametrar som man normalt använder sig av vid klassificering av sannolikheten för brand omfattar flampunkt, brännbarhetsområde och termisk tändpunkt. Även bränsleångornas/gasernas densitet i relation till luft är av intresse då detta ger information kring hur ångor/gas sprids vid ett utsläpp. För vätskor är flampunkten av avgörande betydelse för att bedöma en vätskas antändlighet. Notera att det generellt gäller att ångbildning och ångtryck ökar med minskande flampunkter, varför de är beroende vilket visar på flampunktens betydelse.

Flampunkt: Är den lägsta temperatur en vätska måste ha för att kunna ge upphov till en antändbar bränslekonzentration tillsammans med luft ovanför vätskeytan.

Brännbarhets/explosionsgränser: När en brännbar gas blandas med luft skapas en gasblandning och mängden av brännbar gas brukar oftast uttryckas i volymprocent i förhållande till luftmängden. Vid för låg bränslekonzentration (för mager blandning) är bränslemängden för liten och gasen är då inte brännbar. Gränsvärdet då koncentrationen når en brännbar/explosiv koncentration kallas den undre brännbarhetsgränsen (LEL-Lower Explosion Limit). Ökas koncentrationen av den brännbara gasen ytterligare kommer man till slut till en gräns där bränslemängden blir för stor (för fet blandning) och gasblandningen blir då återigen inte brännbar och detta gränsvärde kallas den övre brännbarhetsgränsen (UEL-Upper Explosion Limit). Området mellan LEL och UEL utgör alltså gasens brännbarhetsområde.

För vätskor kan även brännbarhetsområdet uttryckas som ett temperaturområde, det vill säga den temperatur som vid stationära förhållanden i ett slutet kärl ger upphov till en bränslekonzentration som motsvarar LEL respektive UEL. Dessa betecknas då som LEP (Lower Explosion Point) respektive UEP (Upper Explosion Point) och uttrycks alltså i °C. I praktiken kan man säga att LEP motsvaras av flampunkten.

Termisk tändpunkt: Den temperatur som krävs för att antända en gasblandning utan annan extern tändkälla, till exempel gnista eller öppen låga.

Relativ densitet: Anger bränsleångornas densitet i relation till luft. Om bränsleångorna är betydligt tyngre än luft finns stor risk för ansamling av brännbara gaser i lågpunkter, vid en densitet betydligt lägre än luft stiger gasen och blandas snabbare ut med luft så att koncentrationen sjunker under brännbarhetsgränsen. Risken med lättare gaser är dock att den kan ansamlas i håligheter precis under taket.

Nedan följer en sammanställning av riskparametrarna för de olika bränslena följt av en generell beskrivning av de olika drivmedlens brandegenskaper.

Tabell 2 Egenskaper som påverkar sannolikheten för antändning.

Ämne	Relativ densitet (luft=1)	Flampunkt (°C)	Brännbarhetsområde (volym-%)	Termisk tändpunkt (°C)
DME	1,6	Gas	3,4 – 27	350
LPG (PROPAN)	1,56	Gas	1,7 – 10,9	450
METAN	0,6	Gas	5 – 15	540
VÄTE	0,1	Gas	4 – 77	560
BENSIN	3,5	<-20	1 – 8	400
DIESEL	7	60	1 – 7	220

En vätska som har en flampunkt över sin normala temperatur kan inte väntas producera antändliga gasblandningar om inte temperaturen höjs över flampunkten. Diesel sticker ut med en hög flampunkt. För att en brännbar blandning ska antända krävs en antändningskälla såsom en varm motordel eller elektrisk gnista. Flera av de alternativa drivmedlen har ganska stort brännbarhetsområde vilket ökar sannolikheten för brännbar blandning. Den temperatur som krävs för antändning är dock relativt lik bensin med diesel och DME som sticker ut med en låg termisk tändpunkt.

3.2 Explosion

NFPA definierar en explosion som ett snabbt utsläpp av gas under högt tryck (Cruice, 1991). Ett nyckelord är "snabbt" som medföljer en tryckvåg. Ett exempel på en sådan explosion relevant för denna studie är ett tankbrott, det vill säga en tryckkärlsexplosion. En annan är kemisk reaktion (t.ex. förbränning) som medför snabb tryckökning (Bjerketvedt et al., 1997). Ett exempel på en sådan explosion är en antändning av brännbar gas-luft blandning. En explosion kan alltså vara antingen fysikalisk, t.ex. en gastank som brister på grund av för högt tryck, eller kemisk (exotermisk reaktion), t.ex. som följd av antändning (Cruice, 1991). Tryck utjämnas med ljudets hastighet. Den initiala tryckamplituden i en tryckvåg från en tryckkärlsexplosion beror på gasens tryck vid utsläppet. Energin i tryckvågen beror på mängden gas, tryck och temperatur och en uppskattning av energin fås genom att multiplicera trycket med volymen.

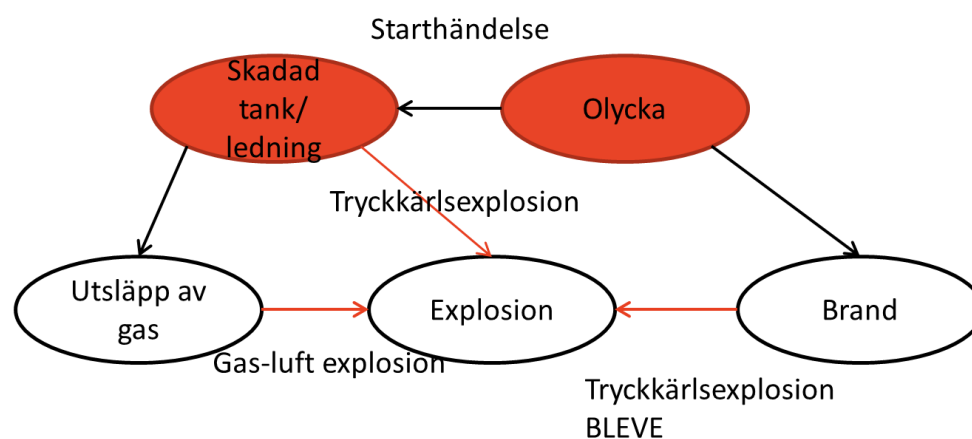
För den del av gasen som är i vätskefas vid en tryckkärlsexplosion kan en BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) ske när den vätskeformiga gasen snabbt förångas av den varmare omgivningen. För att en BLEVE ska kunna ske behöver vätskan vara uppvärmd över sin 'superheat limit'. Från Tabell 3 nedan så förstås att en BLEVE enbart kan väntas för brandutsatta tankar (Cruice, 1991). En BLEVE kan innebära livsfara, inte bara i fordonets närhet utan även resultera i att delar av tanken kastas mycket långt. Vid antändning av gasen uppstår hög värmestrålning och kan utsätta personer på relativt stort avstånd för mycket hög värmeexponering och leda till antändning av angränsande objekt. Det är omöjligt att ange ett specifikt riskavstånd utan detta är beroende på tankens storlek och övriga förutsättningar såsom tankens placering, infästning på fordonet etc.

Tabell 3 Temperatur som krävs för en BLEVE.

Flytande gas	Superheat limit (K)	Förvaringstemperatur (°K)
LNG	180	111
DME	Troligen uppemot 400	288
LPG	326	288

Om ett utströmmande gasmoln antänds ökar energin och längden av stöten förlängs men tryckamplituden påverkas inte. Reaktionen startar vid antändningskällan och rör sig i

brännbar blandning framåt med en flamfront. Produktgaserna med sin höga temperatur vill ta mycket mer plats vilket bidrar till tryckvågen. Reaktionen kräver en tillräcklig temperaturökning och brännbar blandning så att närliggande gas kan antändas för att fortgå. Ju högre temperatur och ju närmare stökiometrisk blandning, desto snabbare antändning och rörelse (reaktion) genom gasen. Angränsande luft och förbränningsprodukter expanderar av temperaturökningen från förbränningsreaktionen. Om omslutande material inte är starkt nog kommer det att ge vika med en explosion som följd. Få strukturer är starka nog att stå emot gasolnsförbränningar, även om molnet bara upptar en begränsad del av utrymmet. Gasansamling i byggnader påverkas främst av utsläppshastighet och byggnadens ventilation. Lättare gaser, t.ex. metan och vätgas, kan ansamlas under tak eller i garage. Tyngre gaser, t.ex. ångor från bensen och DME ansamlas i låga punkter. Antändningen av en kolväte-luft blandning i det fria leder till försumbara tryck. För att nå högre tryck krävs hinder i vägen som leder till turbulenta flöden som snabbar på reaktionen. Detta betyder att explosioner i t.ex. byggnader eller rör når högre tryck än om de skulle ha skett ute i det fria. I en sluten behållare kommer även en långsam reaktion att ge en tryckökning eftersom gasen inte kan expandera någonstans. Tryckuppbyggnaden vid en deflagration är måttlig, t.ex. kan kolväte-luft blandningar vid normalt tryck och temperatur i slutna behållare nå upp till 8-10 bar vid antändning (Bjerketvedt et al., 1997).



Figur 2 Enkelt händelsetråd över de tre olika explosionerna (tryckkärlsexplosion, gas-luft och BLEVE).

En deflagration i en gasolnsblandning kan övergå till en detonation om förbränningshastigheten når över ljudets hastighet. Vid övergången från deflagration till detonation sker en markant lokal tryckökning, uppemot 50 bar. Sedan fortgår detonationen vid 15-20 bars tryck. Sannolikheten för en detonation beror på bränslet. Enligt (Bjerketvedt et al., 1997) kan vätgas detonera medan metan är mycket svårare att få till en detonation. En annan faktor som ökar risken för en snabb flamspridning (deflagration till detonation) är fysiska begränsningar, t.ex. en sluten behållare, ett slutet rum eller en tunnel eftersom det hindrar gasernas expansion vilket leder till ökat tryck. Har väl en övergång till detonation skett behövs inga hinder eller inneslutningar för att den ska fortgå i sin höga utbredningshastighet. En detonation är troligare i ett rör än i en behållare. Ju fler hinder i vägen, desto snabbare blir flödet turbulent och kan övergå till en detonation. Det verkar dock inte vara ett troligt scenario för en vägtunnel med en diameter på minst 6 m eftersom det skulle krävas ett väldigt långt gasmoln, uppskattningsvis 500 m längd av brännbar gasblandning (Bjerketvedt et al., 1997). Mindre mängd skulle kunna räcka för vätgas som är mer reaktiv. Hinder i taket kan påskynda, och kan vara en förutsättning för en övergång till detonation. I Figur 2 finns de tre olika explosionerna markerade i ett händelsetråd utifrån en tänkt olycka eller fordonsbrand.

Enligt (Bjerketvedt et al., 1997) är dödsfall direkt orsakade av tryckökningen från explosioner ovanliga. Dödsorsaker till följd av explosion, t.ex. brand eller raserade byggander är desto vanligare. Byggnader fallerar generellt redan vid relativt små tryckökningar. Konsekvenser av tryck sammanfattas i Tabell 4 nedan (Cruice, 1991, Bjerketvedt et al., 1997, Perrette and Wiedemann, 2007, Ingason et al., 2012):

Tabell 4 Konsekvens från tryck.

Tryck (kPa) (1 bar=100 kPa)	Fysikalisk effekt
5-7	Slår omkull en person, vanliga fönster går sönder, skador på vanliga byggnader
34	Nedre gräns för knäckt trumhinna, farligt fönstersplitter från vanliga fönster
100	Nedre gräns för lungskador
240	Nedre gräns för dödsfall
345	50% dödsfall
450	99% dödsfall

Det har inträffat ett antal explosioner med CNG/LPG-fordon inblandade där materiella skador på fordon och intilliggande hus varit omfattande. I de värsta fallen har gas läckt i garage under mark eller ner på källarplan. Ett antal explosioner har även skett under tankning eller efter brandpåverkan. Fallen som berör tankning beror oftast på defekta tankar eller felaktig montering. Berg (2014) påpekar att dagens brandtester av tankar skiljer sig mycket åt och har en mängd ospecificerade parametrar som kan påverka testet. En verklig brand kan ge en helt annan brandexponering än den som tanken testats för. När tanken värms upp försvagas materialet och trycket i gasen ökar med temperaturen. En behållare som når sin tryckgräns kommer att gå sönder i sin svagaste punkt och tryckvågen kommer att färdas i en riktning ut ifrån brottet.

3.2.1 Explosioner i slutna utrymmen

För interna explosioner i byggnader kan högre tryck än i det fria väntas, speciellt om ingen tryckavlastning kan ske genom fönster eller lättare paneler som snabbt öppnar sig/flyger iväg. Viktiga faktorer är om byggnadens integritet bibehålls och huruvida farliga fragment skjuts iväg. Den senare påverkas av materialval i väggar. Prefabricerade väggar och tak kommer att kollapsa. Tegelstenar och fönster kan skjutas iväg. En ram i stål eller armerad betong är tåligare mot tryck. En byggnad som ska stå emot externa explosioner ska vara gjord av stål eller armerad betong och ha små tåliga fönster med kraftig ram. För en byggnad som ska stå emot interna explosioner gäller att byggnaden ska ha en stark ram struktur som håller upp våningsplan och tak. Väggarna ska vara öppna eller gjorda av lättvikspanel. I en smart byggnad tillåts byggnadsdelarna falla plastiskt (snarare än elastiskt) utan snabba brott (flexibla element), vilket tar upp mycket energi från explosionen. En annan viktig faktor för byggnaders svar på en tryckvåg är byggnadens naturliga frekvens, w , i relation till tryckimpulsens tidsutbredning, t_d (Magnusson, 2007):

- För små $w t_d$ beror deformationen på resistans och massa samt det totala arbetet från impulsen.
- För stora $w t_d$ beror deformation enbart på resistans och maxtryck.
- För $w t_d$ emellan dessa ytterligheter ligger den dynamiska regionen, här behöver hela lasthistoriken beaktas, det vill säga tryck och impuls liksom systemets massa och resistans

Gasmolnsexplosioner och tryckkärlexplosioner skiljer sig från explosiver. Explosiver har en väldigt snabb, nästan omedelbar tryckökning som snabbt minskar exponentiellt.

Gasmolnsexplosioner har en långsammare tryckökning och en ännu långsammare återgång till normalt tryck. Detta mer utdragna förlopp leder till att strukturen står emot en faktor 2 högre tryck för stora $w t_d$ och en faktor 2 mindre tryck (på grund av resonans) i den dynamiska regionen, jämfört med explosiver. Tryckkärlsexplosioner stiger snabbt i tryck liksom explosiver men särskiljer sig med en hög och lång negativ tryckimpuls följt av en signifikant andra tryckvåg. Detta leder till en signifikant dynamisk region och att byggnader blir mer sårbara för motsvarande tryckkärlsexplosioner (Baker et al., 1982). Generellt gäller att efterföljande sekundära explosioner, t.ex. antändning av gas, leder till längre tryckimpuls vilket i sin tur leder till en ökad påfrestning för t.ex. garage och tunnlar.

En stökiometrisk bränsle-luft blandning inuti en omslutning kommer att nå ungefär 8 bars övertryck. Trycket minskar generellt ju mindre del av utrymmet som är fyllt, även om en fyllnadsgrad ner till 30-50 % kan ge samma tryckökning eftersom bränsle/luft trycks ut ur utrymmet och inte bidrar till explosionen inuti utrymmet. Om 15 % av ett slutet utrymme är fyllt med en stökiometrisk bränsle-luft blandning blir övertrycket ca 2 bar. En fyllningsgrad på enbart 1-2 % kan utgöra ett problem för många strukturer avsedda för normalt tryck om inte övertrycket kan utjämnas med spjäll eller svaga väggpaneler (Bjerketvedt et al., 1997). En 50 L tank med 200 bar metangas har en ungefärlig volym av 100 m^3 utspädd till 10 %, vilket betyder att skador inte kan uteslutas för garageutrymmen under mark med en takhöjd på 2 m och en area under 5000 m^2 .

En tryckkärlsexplosion i ett slutet rum kan väntas ge ett kammartryck beroende på rummets volym enligt (FortH2, 1991). Ju större volym desto mindre kammartryck för samma laddning. Kammatrycket kan förväntas bli mycket litet i större garage, även om trycket lokalt blir mycket högre.

Trycket i en tunnel påverkas initialt av reflektioner från väggarna men utbreder sig primärt längs tunneln med ett kammartryck liknande ovanstående resonemang (FortH2, 1991). För en vägtunnel med längden 100 m, tvärsnittsarea 50 m^2 och en explosion motsvarande 2 kg TNT fås ett kammartryck på ca 0,1 bar, vilket inte ger några större konsekvenser för tunnel, fordon eller människor.

När en tryckvåg möter en byggnad rakt framifrån kommer trycket mot väggen att utgöras utav både statiskt och dynamiskt tryck eftersom tryckvågen stoppas och reflekteras. Det betyder att trycket mot väggen ungefär ökar med en faktor två för lägre tryck och upp till en faktor 20 för högre tryck. En byggnad kommer att börja svänga beroende på det maximala trycket, snabbheten i tryckökning och byggnadens massa och naturliga frekvens.

1993 exploderade en bilbomb på åtminstone 450 kg i ett garage under World Trade Center (WTC) i New York. Sex miste livet av explosionen och ett tusental skadades i incidenten. Rök spreds snabbt till flera byggnader i WTC komplexet. Omkring 150 000 evakuerades från de olika WTC byggnaderna. Plan B-2, två våningar under mark, där bilen var parkerad var totalförstört. Väggar och fordon blåstes bort som leksaker. Armerade betong golv sprängdes isär. Stålpelare var skadade men intakta. Skadorna var omfattande över 7 våningsplan, varav 6 var under mark. WTC var ett välkonstruerat komplex vilket bidrog till att bygganden klarade sig relativt bra med tanke på den kraftiga explosionen (USFA, 1993).

2011 skedde en gasmolnsexplosion av motorgas i en del av en byggnad under mark byggd i armerad betong i Turkiet (Turgut et al., 2013). Motorgas läckte in i byggnaden från en skadad ledning. Källarplan i byggnaden nyttjades som textilfabrik, men skulle kunna ha varit ett garageutrymme under mark. Explosionen skedde i ett avgränsat utrymme om ca $10 \times 30 \text{ m}$. Källarplanet saknade mekanisk ventilation. Yttre väggar var

omslutna av jord. Ovan jord fanns en tankstation för LPG fordon. En inre vägg avgränsade utrymmet från det övriga källarplanet på 40×30 m. Den inre väggen var inte lätt nog att fungera som lätta paneler som ventilerar och tryckavlastar en explosion, istället bidrog väggen till att öka trycket i utrymmet där explosionen skedde och sedan utgjorde väggen farliga projektiler. När väggen fallerade riktades det höga trycket ut i angränsande utrymme. Skadorna på byggnadens struktur blev stora i utrymmet där explosionen skedde med minskande allvarlighet mot motsatt sida. Mot förmodan av en så pass kraftig explosion kollapsade inte byggnaden, men flera pelare blev tillplattade när trycket lyfte taket så att pelare drogs isär. Sedan föll taket ner igen och tryckte ihop pelarna. Delar av taket hängde som en hängmatta inne i byggnaden och ovan mark hade stora delar av betonggolvet brutits upp. Det maximala övertrycket uppskattades till 0,6 bar. En person omkom på källarplan och 21 skadades allvarligt (Turgut et al., 2013).

Enligt Wijesundara och Clubley (2016), har inte uppåtriktade krafter på tak tidigare studerats även om det leder till större skador, speciellt om tryckavlastningen är begränsad som den ofta är t.ex. i källare och garage under mark. I slutna utrymmen kan sekundära tryckvågor som reflekterats mot väggar vara lika höga som den primära tryckvågen från explosionen, dessa kan leda till stora skador eftersom de kan komma samtidigt som uppåtriktade krafter tar bort lasten från t.ex. pelare. Som regel blir armerad betong starkare ju högre last de bär därmed är de känsliga för sekundära tryckvågor i kombination med uppåtriktade krafter som tar bort last. Pelare måste vara väl förankrade i golv och väggar om de ska klara av uppåtriktade krafter bra.

3.2.2 Gasers beteende i slutna utrymmen

Utsläpp av en lättare gas såsom vätgas och metan, se Tabell 2, i ett inneslutet utrymme leder till att gasen stiger och ansamlas under taket. Tjockleken av gas-luft blandningen beror på förhållandet mellan destabiliserande rörelsemängd ("buoyancy momentum") när den lätta gasen stiger och den stabiliserande termiska kraften ("buoyancy") från en ökad gaskoncentration i gas-luft blandningen med höjden. Över ett kritiskt värde bildas ett välblandat lager med en konstant tjocklek. Under det kritiska värdet bildas ett stratifierat gaslager under taket som växer i tjocklek med avståndet från källan så länge som utsläppet pågår. När utsläppet slutar kommer det stratifierade lagret att lösas upp på grund av molekylär diffusion. Efter en mycket längre stund än utsläppet varade kommer en homogen gas-luftblandning uppstå i det slutna utrymmet. Vid så pass hög utsläppshastighet att det dominerar över termikkraften kommer en blandning med luft att ske genom att luft sugas in i utsläppsplymen, vilket snabbt kan leda till en homogen luft-gasblandning (HySafe, 2009).

Vid sidledes ventilation kan det antas att samma beteende sker som för rökplymen och röken i en tunnel (Ingason et al., 2015). Vid ingen eller låg ventilation slår gasplymen i taket och sprider sig sedan symetriskt i alla riktningar längs taket. Vid låg ventilation, 1-2 m/s, stiger gasplymen mot taket och sprider sig både delvis uppströms och nedströms längs taket. Uppströms begränsas mängden gas av att ventilationen till slut övervinner gasens rörelsemängd och för med sig gasen tillbaka mot källan. Vid högre ventilation än ungefär 3 m/s är luftens rörelsemängd starkare än gasens så att all gas går med ventilationsriktningen (Ingason et al., 2015). De vanligaste gaserna som avges från Li-ion batteri är koldioxid, kolmonoxid, vätgas och kolväten (Colella et al., 2016).

Gaser som är tyngre än luft, DME och LPG, se Tabell 2, kommer istället att ansamlas längs golvet eller i låga utrymmen såsom golvbrunnar. Ett liknande, men omvänt beteende som det som beskrivits ovan för gaser lättare än luft kan förutses.

3.3 Konventionella drivmedel (bensin och diesel)

Vid en vätskebrand är det bränslets ångor som tillsammans med luft brinner. Vid ett öppet bränslespill måste vätskan ha en temperatur över dess flampunkt för att kunna antändas. Vid temperaturer över flampunkten kommer det alltid att finnas ett område där bränsleångorna ligger inom sitt brännbarhetsområde som kan antändas om en tändkälla finns närvarande.

Vid förvaring av ett vätskeformigt bränsle i ett slutet kärl kommer ett jämviktstillstånd att infinna sig som leder till en temperaturberoende bränsle/luftblandning. Om temperaturen ligger mellan LEP (flampunkten) och UEP så är bränsleblandningen inne i kärlet brännbar och kan vid en antändning ge upphov till en mindre explosion. Detta innebär också att en brand utanför tanken kan leda till antändning, antingen genom att en flamma tänder bränsleångorna i t.ex. ventilationsöppningen eller annan otäthet, eller att någon del av tanken når bränslets termiska tändpunkt.

3.3.1 Bensin

Bensin är ett mycket lättflyktigt och brandfarligt drivmedel som normalt har en flampunkt som ligger kring -40 °C till -30 °C . Egenskaperna styrs av de bränslespecifikationerna som finns standardiserade för att säkerställa funktionen som motorbränsle. Detta innebär att under den kalla säsongen har bensin (vinterkvalitet) högre ångtryck (mätt vid 20 °C) för att säkerställa start vid låga temperaturer jämfört med sommartid. Bensin har en låg ledningsförmåga vilket gör att det finns risk för bildning av statisk elektricitet vid hantering, t.ex. vid fritt fall av bränslet eller vid transport i långa ledningar.

På grund av det höga ångtrycket är därmed också bränslekoncentrationen inne i bensintanken långt utanför brännbarhetsområdet (ca 1-8%). Uttryckt som temperaturområde innebär detta att LEP är lägre än $-40 - -30\text{ °C}$ och UEP är ca -20 °C (sommarmarkkvalitet). I praktiken innebär detta alltså att om temperaturen är högre än -20 °C så är bränsleblandningen i tanken ”för fet” och är alltså inte brännbar. I dagsläget innehåller bensinen ca 5-7% etanol men eftersom ångtrycket är styrt av standarder påverkar detta antändningsegenskaperna marginellt.

En bensinbrand ger en hög effekt räknat per kvadratmeter brandyta och ger också en hög värmestrålning mot omgivningen. Vid brandytor på några hundra m^2 och uppåt så sjunker värmestrålningen relativt sett på grund av dålig förbränning och ökad sotbildning inne i flamman, vilket även blockerar en del av strålningen.

3.3.1.1 Fordonsrelaterade scenarier

Bensin är ett mycket brandfarligt ämne, men vid normal hantering kan man konstatera att gällande regelverk innebär att säkerheten är mycket god och det förekommer förhållandevis få incidenter. Vid tankning är bränslepumparna utrustade med gasåterföringssystem som effektivt suger bort bränsleångorna från påfyllningsröret vilket minskar risken för antändning. Bilarna är också konstruerade så att risken för alstring av statisk elektricitet vid tankning minimeras. Om antändning trots allt skulle ske är bränslekoncentrationen så hög inne i tanken att branden inte kan fortplantas in i den och skapa en explosion.

Vid ett spill eller utflöde alstras däremot snabbt brännbara ångor som gör bränslet mycket lättantändligt. Erforderlig antändningsenergi är låg och risken för antändning är mycket hög. Antänds bensinen brinner den inom några sekunder med i princip full effekt. Vid kollisioner där det uppstår bränsleläckage är därför brandrisken mycket hög då det finns många tänkbara tändkällor såsom gnistbildning på grund av friktion eller kortslutning, heta ytor, etc.

Spillbranden kan också leda till att bränsletanken exponeras för lågor. I dagens fordon är oftast tanken utförd i plast vilket innebär att denna kommer att värmas upp och smälta. Enligt gällande regelverk UNECE R.034 (UNECE, 2014b) ska en bensintank motstå en standardiserad brandpåverkan under minst 2 min utan att läckage uppstår men därefter kan man förvänta sig att plasten smälter och bränslet flödar ut vilket gör att hela fordonet snabbt involveras i brand. Någon större risk för tankexplosion föreligger dock inte på grund av den höga bränslekoncentrationen inne i tanken och att plast/slangar tappar sin hållfasthet på grund av värmen vilket gör att höga tryck inte kan byggas upp i tanken.

3.3.2 Diesel

Diesel är ett mer svårflyktigt bränsle som normalt har en flampunkt på ca 60 °C. Detta innebär att vid normala temperaturer så kan man inte antända ett öppet bränslespill med en liten tändkälla. På grund av den höga flampunkten är brandspridningen över en bränsleyta betydligt långsammare än för bensen men när branden har utvecklats fullt ut brinner diesel ungefär som bensen. Diesel brinner dock med kraftigare sotbildning och därmed också något lägre värmestrålning.

3.3.2.1 Fordonsrelaterade scenarier

Diesel utgör på grund av sin relativt höga flampunkt en betydligt lägre brandrisk vid tankning och normal hantering och ett spill utgör normalt sett ingen större brandrisk. Däremot kan ett läckage inne i motorrummet, t.ex. på grund av bristande underhåll eller kollision skapa stor risk för brand. Här finns många heta ytor där dieseln kan värmas upp och, på grund av sin relativt sett låga termiska tändpunkt, antändas.

Branden i motorutrymmet kan naturligtvis sprida sig och i vissa situationer också exponera bränsletanken. Även för dieselfordon är plasttankar vanliga, till viss del även för tyngre fordon såsom bussar, och även dessa ska uppfylla UNECE R.034, d.v.s. motstå en brandpåverkan i minst 2 min. Precis som för bensen kan alltså ett läckage förväntas och eftersom det redan brinner kommer den utläckande dieseln omedelbart att involveras i branden. När det gäller bussar och lastbilar är tankarna dessutom mycket större vilket gör att bränslespillet kommer att vara mycket större jämfört med en personbil och på så sätt skapa en större, intensivare och mer långvarig brand. För lastbilar är det vanligast att bränsletankarna är utförda i aluminium eller stålplåt. Detta minskar risken för ett snabbt läckage vid en brandexponering.

3.4 Gasformiga drivmedel

En gas definieras här som ett ämne som vid rumstemperatur inte har en bestämd form eller volym. Gasformiga drivmedel kan hanteras på tre olika sätt, i komprimerad form, i tryckkondenserad form eller som kryogas, det vill säga så kraftigt nedkyld att gasen kondenserat till vätskeform. Lagring och hantering av metan sker både i form av komprimerad gas (CNG) och som kryogas (LNG). Vätgas hanteras främst i komprimerad form medan LPG och DME normalt hanteras i tryckkondenserad form, se summering i nedanstående Tabell 5. Gastankens placering för personbilar brukar vara under bilen eller i den nedre delen av bagageutrymmet. För lastbilar verkar gastankar oftast vara där nuvarande dieseltankar finns, men andra lösningar såsom under lasten eller bakom hytten finns också. På bussar placeras gastankar ofta på taket.

Tabell 5 Typ och form för olika gasformiga drivmedel.

Drivmedel	Komprimerad gas	Tryckkondenserad gas	Nedkyld flytande gas (kryogas)
LPG		X	
DME		X	
CNG	X		
LNG			X
Väte	X		

Komprimerade gaser (t.ex. CNG och vätgas) hanteras i tryckkärl under högt tryck, och beroende på gas och tryckkärls storlek kan det maximala trycket uppgå till 200-700 bar. Det ska här också noteras att tankeexplosioner kan inträffa vid tankning på grund av att tanken då utsätts för sitt maximala tryck. Efter lång användning kan utmattningsfenomen uppstå som i sin tur kan leda till tankeexplosion. CNG och vätgastankar kan vara av fyra olika typer:

1. Metalltank.
2. Behållare av metall inlindad med komposit längs flaskan, men inte över botten och hals.
3. Behållare av metall helt inlindad i komposit.
4. Plastbehållare helt inlindad i komposit.

Tryckkondenserade gaser (t.ex. LPG och DME), har den egenskapen att gasen kondenseras när den komprimeras. Det innebär att tryckkärl innehåller produkten i en vätskefas och en gasfas. Trycket i kärlet varierar med omgivningstemperaturen men är ofta i storleksordningen 5 bar vid 20 °C för att sedan stiga kraftigt med ökad temperatur.

En flytande gas (kryogas) är en gas som kylts ner till under dess kokpunkt och på detta sätt kan förvaras i kondenserad form i tryckkärl (t.ex. LNG med en kokpunkt på -162 °C). Tryckkärl är mycket välisolerat (ungefär som en termosflaska) för att minimera värmeläckage in i kärlet. Det lilla värmefflöde som trots all läcker in i kärlet medför att en liten del av gasen ständigt förångas vilket ökar trycket inne i kärlet och om ingen gas förbrukas innebär det att en del gas behöver ventileras ut genom en säkerhetsventil för att inte nå för högt tryck. Öppningstrycket för säkerhetsventilen anpassas till tryckkärls dimensionering men ligger ofta på runt 5-15 bar.

De senaste halvåret har det skett flera explosioner i gasdrivna fordon i Sverige. Den ena var en buss som brann och som sedan exploderade under tiden som räddningsarbetet pågick. Två brandmän blev lindrigt skadade men hade bussen exploderat bara några minuter tidigare hade brandmännen antagligen skadats allvarligt. Den andra var en sopbil som exploderade under färd, inga skadade. Den senaste var en bil som brann och sedan exploderade, brandmännen var inte i närheten av bilen men delar av taket landade bara en dryg meter från en brandman². Det är viktigt att komma ihåg att även om anmärkningsvärda olyckor sker så är många olyckor med gasfordon inblandade inte värre än olyckor med konventionella fordon (Lönnermark, 2014). Nedan beskrivs gasernas grundläggande egenskaper och därefter redovisas tänkbara fordonsrelaterade brandscenarier beroende på typ av lagring (komprimerad, tryckkondenserad eller kyld).

3.4.1 Metan

Metan (CH₄) är en lukt- och färglös gas som är mycket brandfarlig och explosiv och reagerar häftigt i kontakt med starka oxidationsmedel. Gasen är lättare än luft vilket gör

² http://www.ctif.org/sites/default/files/news/files/extra_news_december.pdf

att gas kan ansamlas under tak eller i garage. Gasen lagras antingen i komprimerad form (CNG) eller som kyld gas i kryptankar (LNG) (Coen, 2010).

Användning av metan/naturgas styrs av standard UNECE R.110 (UNECE, 2014d) vilket även omfattar ett brandprov. I Sverige regleras kraven på CNG-drivna fordons bränslesystem i Vägverkets författningssamling, VVFS 2003:22 6 kap. § 37-64, med ändringar i Transportstyrelsens författningssamling TSFS 2009:16 av § 38,39 och 43. Säkerhetssystemet för CNG- och LNG-tankar är uppbyggt för att förhindra tryckstegring i gastanken och släpper ut gas om trycket blir för stort. Komprimerad gas har ett tryck på ca 200-250 bar i tanken där det höga trycket är nödvändigt för att tanken ska rymma tillräckligt mycket bränsle och ge en tillräcklig räckvidd för fordonet (Coen, 2010). Tanken för metan brukar bestå av en metalcylander som kan vara täckt med kolfiber- eller glasfiberväv. CNG-system har en lågtryckssida efter tryckregulatorn som sänker trycket till 10 bar. LNG-tankar har troligen ett arbetstryck på under 20 bar även om R.110 gäller upp till 260 bar, se Tabell 6.

Tabell 6 Bränsletankar för metanfordon

	CNG	LNG
Arbetstryck	200 bar	5-20 bar
Temperatur	-	-162°C
Volym	Normalt 25-250 l för bilar och mindre fordon. För tunga fordon 50-400 l. (multipla behållare kan användas)	Normalt omkring 100 l för bilar och mindre fordon. För tunga fordon totalt 700-900 l (normalt fördelat på två tankar)
Dimensionerande tryck	2 × arbetstryck	2 × arbetstryck
Säkerhetsventil	1.5 × arbetstryck och 110±10°C	1.5 × arbetstryck

3.4.1.1 Fordonsrelaterade scenarier för komprimerad metan (CNG)

Ett antal olika brandscenarier för CNG-fordon kan förutses. Ett fall kan vara att fordonet tagit eld och att branden sprider sig så att även tankarna exponeras. Ett annat fall kan vara vid en kollision där det andra fordonet läcker bränsle som antänds och rinner in under gastanken. Ett tredje fall kan vara att läckage uppstår i anslutande ledningar vilket vid antändning eventuellt kan ge en jetbrand riktad mot någon del av tanken. I samtliga dessa fall kommer tanken och dess innehåll att snabbt värmas upp vilket leder till en tryckstegring inne i tanken. Tankens säkerhetsventil ska öppna vid hög temperatur och/eller förhöjt tryck. Detta kommer i sig att resultera i en häftigt utströmmande gas som på grund av omgivande brand kommer att antändas och ge en mycket kraftig jetbrand. Säkerhetsventilen ska enligt UNECE R.110 vara riktad för att inte ge ytterligare brandpåverkan på tanken men kan naturligtvis i vissa fall, direkt eller indirekt, exponera övriga delar av fordonet eller angränsande fordon. Eftersom mängden gas är relativt begränsad när den lagras i komprimerad form kommer tanken att tömmas på gas relativt snabbt vilket också leder till sjunkande tryck. Om brandpåverkan på tanken är kraftig kommer materialet i tanken att hettas upp och därmed tappa en stor del av sin hållfasthet och om inte tryckavlastningsventilens kapacitet är tillräcklig i förhållande till mängden gas i tanken kan detta leda till så högt tryck att tanken exploderar. Detta kan innebära livsfara, inte bara i fordonets närhet utan även resultera i att delar av tanken kastas mycket långt. En explosion kan inträffa vid fullt utvecklade bränder ca 10-25 minuter från det att branden startar (MSB, 2016b). Teoretiskt, kan en tryckkärlexplosion av en 130 L CNG-tank vid ett tryck på 200 bar frigöra en energi som uppskattningsvis

motsvarar en detonation av ca 1,85 kg TNT (8,7 MJ). Fönster kan gå sönder inom 30 m radie (50 mbar) och tryckvågens dödlighet kan förutses inom en radie av 12 m (140 mbar) (Perrette and Wiedemann, 2007). Vid en olycka i Indianapolis, 27 januari 2015, där en gastank exploderade kunde man hitta material som kastats 1,2 km från fordonet³.

En Amerikansk studie (Lowell, 2013) redovisar internationell statistik över CNG-olyckor varav merparten kommer från USA, se Tabell 7 nedan. 50 tankbrott har alltså skett vilket man kan tolka som 50 tryckkärlsexplosioner under perioden 1976-2010. Detta är den vanligaste olyckan som är inrapporterad, vilket dock kan bero på att många andra mer gynnsamma fall inte fångades upp. Flertalet av tryckkärlsexplosionerna skedde under tankning eller under brandpåverkan. 18 fall av tankbrotten berodde på skadade cylindrar vilket hade kunnat fångas upp genom inspektion. 14 av fallen berodde på att säkerhetsventilen inte löste ut under brandpåverkan. I mer än hälften av fallen då säkerhetsventilen löste ut antändes gasen, ofta på grund av dålig installation, t.ex. med rör dragna genom motorrummet.

Tabell 7 Incidenter med CNG-fordon under perioden 1976-2010 i hela världen (Lowell, 2013).

Incident	Antal
Tankbrott	50
Säkerhetsventil som felaktigt löst ut	14
Fordonsbrand utan tankbrott	12
Läckande tank	14

Även i Sverige har det på senare tid skett tryckkärlsexplosioner vid tankning av gasfordon⁴. Enligt uppgift från Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) exploderade tankarna vid 230 bars tryck. Tanken ska klara av 400 bars tryck och säkerhetsventiler är anpassade till detta. Tankar med lägre hållfasthet har större sannolikhet att explodera innan säkerhetsventilen löser ut vid en brand.

3.4.1.2 Fordonsrelaterade scenarier för flytande metan (LNG)

Tankar för flytande metan/naturgas (LNG) rymmer betydligt mer då gasen är kondenserad vilket är en stor fördel då det ökar fordonets aktionsradie. LNG-tanken har en konstruktion som kan liknas vid en stor termos, i vissa fall kombinerad med en isolering av perlit, för att minimera värmetransport in i tanken. Detta innebär en stor fördel i brandsammanhang då konstruktionen därmed också minskar uppvärmningen av gasen vid brandpåverkan. Den isolerande konstruktionen ger till viss del också ett extra skydd mot mekaniska skador av tanken. Även en kryotank avsedd för användning på fordon skall uppfylla UNECE 110 vilket då alltså omfattar ett brandprov.

Om tanken skadas så att läckage utan att brand uppstår kan två olika situationer inträffa. Uppstår läckaget ovanför vätskeytan av den kalla, kondenserade gasen kommer läckaget generera ett gasmoln. Läckaget kommer dock att avta i intensitet då trycket i tanken sjunker eftersom förångningen kräver värmetillförsel. Om tanken skadas så att läckaget uppstår under vätskeytan, kommer kall vätska att strömma ut under tryck och inledningsvis förångas häftigt när den träffar marken eller andra varma ytor (relativt -162 °C) men kommer därefter, framför allt vid större mängder, att relativt snabbt att kyla ner underliggande markyta och resultera i en vätskeformig pöl som därefter förångas i en långsammare takt och bildar ett mer långvarigt gasmoln. Ett läckage av en kryogas kan på grund av dess mycket låga temperatur också ge frostsador på människor och material.

³ http://www.ctif.org/sites/default/files/news/files/extra_news_december.pdf

⁴ <http://www.expressen.se/dinapengar/volkswagen-aterkallar-gasbil-efter-explosion/>
<http://teknikensvarld.se/gasbil-exploderade-vid-tankning-av-biogas-i-linkoping-182638/>

Vid brandpåverkan kommer naturligtvis den nedkylda gasen inne i tanken att värmas upp. Det ökar förångningen och därmed också trycket inne i tanken vilket även här leder till att säkerhetsventilen kommer att öppna. Är isoleringen runt tanken endast utformad som en termosflaska och denna är skadad, kommer isolerförmågan att minska drastiskt även om ”termoskonstruktionen” kommer att fungera som en flamskärm. Om isoleringen utgörs av en termosflaska kombinerad med isolermaterial kommer isolerförmågan att bibehållas betydligt bättre och värmeflödet vara betydligt mer begränsat vilket gör att säkerhetsventilen har stora förutsättningar att hålla trycket i tanken på en säker nivå tills branden släckts eller gasen brunnit ut. Under olyckliga omständigheter med skadad isolering finns det dock möjlighet att värmepåverkan blir mycket kraftigt så att säkerhetsventilen inte hinner hantera tryckökningen vilket då kan leda till att trycket stiger ytterligare. Eftersom tankens hållfasthet samtidigt minskar, kan detta leda till en tankexplosion som resulterar i en BLEVE, vilket innebär att den nu upphettade kondenserade gasen förångas momentant när tanken brister och trycket utjämnas. Detta kan leda till ett stort brinnande aerosol/gasmoln som stiger uppåt och ger en mycket hög värmestrålning mot omgivningen under några sekunder.

Till skillnad från spill av vätskeformiga bränslen, där man ofta försöker tvätta ur ett gasmoln med vattendimma, skall detta undvikas vid utsläpp av kondenserad gas då värmen från vattnet kommer att öka förångningshastigheten. I detta fall måste man i så fall förhindra att vattnet kommer i kontakt med vätskepoelen och om möjlighet finns, istället försöka täcka över spillet med någon form av presenning eller motsvarande eller att använda ”mycket torrt” CAF (Compressed Air Foam) för att minska förångningshastigheten.

Utsläpp av den kondenserade formen av metangas sprids efter marken och fyller snabbt lågt liggande utrymmen. Efter en tid börjar gasen att blanda sig med luften och spridas till omgivningen. Gasmolnet syns bra då den kalla gasen får vattenånga i luften att kondensera och bilda dimma. Oavsett om det är kondenserad eller komprimerad gas som släpps ut bildas snabbt brännbar blandning med luft. Gasmolnet kan antändas och brännas av då flamfronten sprids genom molnet. Om gasmolnet är inneslutet i något när det antänds kan det leda till en gasmolnexplosion. Gastankar som är direkt värmepåverkade och saknar en fungerande säkerhetsventil kan leda till BLEVE eller kärlsprängning. Utströmmande gas är på grund av metangasens låga kokpunkt kall och kan orsaka köldskador (Coen, 2010).

3.4.2 Dimetyleter och motorgas

Dimetyleter (C_2H_6O), DME, är den enklaste etern och är en gas som inte är hälso- eller miljöfarlig enligt den nu gällande lagstiftningen. Gasen har handelsnamnet Dimetyleter men kallas även för Metyleter. Den hanteras i tryckkondenserad form på samma sätt som motorgas eller flytande petroleumgaser (LPG) (Coen, 2010) och har ett tryck på ca 5 bar vid 20 °C. Dimetyleter är stabil i kontakt med luft och genomgår inte autooxidation till potentiellt explosiva peroxider till skillnad från andra alkyletrar (Naito et al., 2005).

Riskerna med DME liknar de risker som finns med LPG som regleras i UNECE R.067 (UNECE, 2014c), se Tabell 8 nedan. DME är en mycket brandfarlig och lättantändlig gas som har en högre densitet än luft. Gasens brännbarhetsområde anges till 3,4 - 27 vol.% (Fujimoto, 2007). Detta är ett större brännbarhetsområde än t.ex. LPG (ca 2-10 %) vilket innebär att det vid ett utsläpp skapas ett större område med brännbar blandning jämfört med LPG. På samma sätt som LPG verkar DME kvävande och gasen lägger sig efter marken och söker sig till låga utrymmen.

Tabell 8 bränsletankar för LPG-fordon

	LPG (Propan/Butan)
Normalt arbetstryck och temperatur	7 bar, 15 °C
Volym	Ungefär som konventionella fordonstankar.
Dimensionerande tryck	30 bar
Säkerhetsventil	32±1 bar (ev. även smältbleck 120±10 °C)

3.4.2.1 Fordonsrelaterade scenarier för dimetyleter och motorgas

Vid ett läckage eller en brandsituation kan man förvänta sig att DME uppför sig på samma sätt som LPG och till viss del som LNG. Om tanken skadas så att läckage uppstår kan två olika situationer inträffa. Uppstår läckaget ovanför vätskeytan av den kondenserade gasen kommer läckaget generera ett gasmoln. Läckaget kommer sannolikt att succesivt avta i intensitet då trycket i tanken sjunker eftersom förångningen kräver värmetillförsel. Om tanken skadas så att läckaget uppstår under vätskeytan, kommer den vätskeformiga gasen att strömma ut under tryck och inledningsvis förångas häftigt när den träffar marken eller andra varma ytor men kommer därefter att succesivt att kyla ner underliggande markyta mot gasens kokpunkt (-25 °C). Om det är en stor tank kan detta resultera i en vätskeformig pöl som därefter förångas i en långsammare takt och bildar ett mer långvarigt gasmoln.

Vid simulering av ett mindre utsläpp av LPG på 0,21 kg/s leder det till försumbara gasmoln med en stökiometrisk luft-LPG blandning, men en LPG tank på 70 l kan ge ett gasmoln om 100 m³ i ett garage om utsläppsriktningen är uppåt mot taket och 0,55 kg/s. Ett sådant gasmoln kan få stora konsekvenser vid antändning. Ett ännu större gasmoln kräver ett snabbare utsläpp, som kan uppnås om utsläppet sker i vätskefas istället, uppemot 200 m³. I ett 30 × 30 × 2,4 m³ garage leder antändning i värsta fall till ett övertryck på 30 kPa i hela garaget. Ett gasmoln på 50 m³ ger en liten tryckökning om 5 kPa. En hög ventilationshastighet på 0,060 m³/s, ca 100 luftombyten per timme eller i medel 0,8 m/s luftflöde i garaget krävs för att späda ut ett stökiometrisk 200 m³ gasmoln under brännbarhetsgränsen inom 60 s (Van den Schoor et al., 2013).

Vid brandpåverkan kommer naturligtvis den kondenserade gasen inne i tanken att värmas upp vilket ökar förångningen och därmed ökar trycket inne i tanken vilket leder till att säkerhetsventilen kommer att öppna. Enligt det ”Bonfire-test” som ingår i UNECE R.067, där tanken utsätts för en standardiserad brandkälla, är kravet att säkerhetsventilen skall säkerställa att tryckavlastning sker så snabbt att det inte resulterar i en explosion. Provningsmetoden är dock relativt vagt skriven varför brandpåverkan kan variera avsevärt beroende på hur provningen genomförs.

Om värmepåverkan mot tanken blir kraftigare än den som används vid godkännandeprovningen av tanken är det inte säkert att säkerhetsventilen hinner hantera tryckökningen vilket i sin tur leder till att trycket stiger ytterligare. Van den Schoor (2013) uppskattar att sannolikheten för att säkerhetsventilen inte löser ut är 6,2×10⁻⁸. Eftersom tankens hållfasthet samtidigt minskar, kan detta leda till en tankexplosion som resulterar i en BLEVE, vilket innebär att den nu upphettade kondenserade gasen förångas momentant när tanken brister och trycket utjämnas. Detta kan leda till ett mycket stort brinnande aerosol/gasmoln som stiger uppåt och ger en mycket hög värmestrålning mot omgivningen under några sekunder. Detta är ett förlopp som kan gå relativt snabbt och det finns exempel där en BLEVE inträffat efter mindre än 5 min brandpåverkan. Ett övertänt LPG-fordon i Tyskland 2014 exploderade och skadade 10 brandmän varav 5 allvarligt som försökte släcka fordonet. Brandmännen fick bland annat svåra brännskador (MSB, 2016b).

Även om tanken är utrustad med en säkerhetsventil som är dimensionerad för brandpåverkan så kan problem uppstå om fordonet vält eller ligger uppochnar. I detta fall är det inte gasfasen som strömmar ut genom säkerhetsventilen utan vätskefasen av gasen. Detta kan då resultera i en mycket kraftig jetbrand samtidigt som kapaciteten av tryckavlastningen reduceras betydande. Detta kan innebära en snabb tryckstegring och risken för en BLEVE är överhängande.

Flera olyckor har skett med LPG fordon i garage. Utanför Lyon i Frankrike exploderade en fordonstank med LPG som saknade säkerhetsventil efter en anlagd brand 1999. Sex brandmän skadades allvarligt. 2002 kollapsade en byggnad efter att ett LPG fordon läckt gas till källarplan som exploderade. Explosionen påverkade 39 byggnader inom en radie på 200 m. Taket till LPG fordonet påträffades 150 meter bort (Lönnermark, 2014).

3.4.3 Vätgas

Vätgas är en luktlös, färglös och ogiftig gas. För att göra en gas möjlig att upptäcka tillsätts ofta olika ämnen med stark lukt i gasen. Det görs även för vätgas men om vätgasen ska användas i bränsleceller går det inte då dessa kräver en hög renhetsgrad på bränslet för att fungera. Vätgas består av två väteatomer och är det lättaste grundämnet vilket gör att gasen kan ansamlas i t.ex. garage eller under tak. Vätgasens energidensitet per massenhet är hög, men låg per volymenhet, vilket gör att gasen är svår att lagra och transportera. När det gäller fordon kan vätgas antingen användas som ett drivmedel till en vanlig förbränningsmotor eller i en bränslecell för elproduktion. I Europa har det antagits gemensamma regler för typgodkännande av fordon med avseende på vätgasdrift och för typgodkännande av vätgaskomponenter och vätgassystem. Det har också fastställts krav för installation av sådana komponenter och system. Reglerna finns i Europaparlamentets och rådets förordning om typgodkännande av vätgasdrivna motorfordon i direktiv 2007/46/EG (Coen, 2010). Från och med 2014 finns ett fåtal tankställen för vätgas med 700 bars tryck i Sverige och Norden⁵. Erfarenheten av vätgas är fortfarande mycket begränsad med få fordon i drift.

Vätgas används som fordonsbränsle i form av komprimerad gas med ett tryck på 350 eller 700 bar. Vätgas har en liten molekylstorlek och en hög diffusionskoefficient vilket innebär att gasen kan ta sig in i porösa material. Kolstål som normalt används i gasflaskor är för poröst för att användas i gasflaskor som ska innesluta vätgas. Vätgasen diffunderar in i materialet och gör det sprött, så kallad väteförsprödning. På grund av detta används rostfritt stål i gasflaskor för förvaring av vätgas (Coen, 2010). Placeringen av tankarna kan väntas likna placeringen för CNG-tankar. UNECE R.134 (UNECE, 2014e) och GTR13ECE (UNECE, 2014a) ställer krav på vätgasfordon och dess komponenter, se Tabell 9 nedan. Vätgasfordon har tryckregulatorn placerad närmare tanken än CNG fordon och efter den är trycket runt 1 bar.

Tabell 9 Bränsletankar för vätgasfordon

	Vätgas
Arbetsstryck	350 eller 700 bar
Volym	5.6 kg/cylinder Tunga fordon: 8 st. cylindrar
Säkerhetsventil	Ska finnas men detaljerade regler saknas. Tillverkare får själva bestämma.

⁵ Scandinavianhydrogen.org

3.4.3.1 Fordonsrelaterade scenarier

Vätgasen brinner med en mycket varm och nästan osynlig låga som inte sotar något. Lågans temperatur ligger på cirka 2 000 °C. Andra risker med vätgas är det höga tryck som används vid dess förvaring, dess förmåga att förspröda olika material, dess låga temperatur vid utflöde samt att den på grund av sin storlek lätt kan ta sig ut i det fria genom kopplingar och skarvar. Dessutom krävs en liten energi för antändning samtidigt som en antändlig blandning uppstår med luft mellan 4 – 75 vol.% (Coen, 2010). Ofta sker spontan antändning vid utsläpp av gas av anledningar som inte är klarlagda (Berg, 2014, Groethe et al., 2007). Enligt FM Global bör inte vätgas förvaras inomhus. Vid utsläpp inomhus sker nästan alltid antändning, i tre av fyra fall blir följden explosion och i ett av fyra fall brand (FMGlobal, 2012).

De typer av fordonstankar som används för vätgas är samma typer som används för CNG. Även om Zalosh (2008) rapporterar att inga olyckor med vätgastankar har skett så är de utsatta för samma felmekanismer som CNG tankar. För att se vad som kan väntas om en säkerhetsventil inte löser ut genomfördes tester i USA med en propanbrännare under två vätgastankar på ca 350 bar och ca 80 L utan säkerhetsventiler. Tankarna exploderade efter 6-12 min beroende på tankkonstruktion. Delar av tankarna spreds upp till 82 m från platsen. I båda testerna uppkom ett brinnande vätgasmoln (7-24 m diameter) så fort tankarna gick sönder. Energin i explosionerna uppskattades av Zalosh till 13-15 MJ. Perrette och Wiedemann (2007) uppskattar energin i samma försök till 6,3 MJ, motsvarande 1,35 kg TNT. Notera att TNT-ekvivalenter för tryckkärlsexplosion eller gasmolnsexplosion inte ger en korrekt bild för dessa explosioner då de skiljer sig mycket åt. Energiinnehållet är även det svårtolkat eftersom det största trycket troligtvis kommer från tryckreduceringen när tanken rämnar och gasen expanderar till normalt tryck. Efterföljande antändning kan ge en kraftig explosion i slutna utrymmen, upp till 8 bar. Erfarenheterna från testerna visar att riskzonen runt ett vätgasdrivet fordon med hänsyn på risken vid kärlsprängning borde vara en radie på cirka 100 m från fordonet. För att minska värmepåverkan på tankarna har en del tillverkare börjat isolera tankarna så att de ska klara bränder som uppstår i fordon på ett bättre sätt (Coen, 2010).

3 mars 1983 exploderade ett 600 m³ gasmoln med 4,5 kg vätgas i centrala Stockholm. 16 människor skadades, 10 fordon skadades, fasaden på den närmsta byggnaden var rejält skadad och fönster gick sönder inom en radie på 90 m. Gas strömmade ut från två läckor samtidigt (T-koppling gick sönder på en ledning med 18 sammankopplade 50 l flaskor) (Venetsanos et al., 2003). Ett utsläpp av vätgas i det fria från en säkerhetsventil ger troligtvis små effekter, t.ex. en jetflamma. För att kunna gå mot en detonation krävs ett snabbt utsläpp, t.ex. 40 kg vätgas på 350 bar med antändning efter 30 s, i en innesluten miljö, till exempel en tunnel (Venetsanos et al., 2008). Notera att antändning behöver ske efter relativt lång stund, 30 s, för att få större explosioner medan det troligaste är att vätgasen antänder tidigt vid utsläpp då vätgas är extremt lättantändligt. Samtidigt så späds vätgas snabbt ut med luft, speciellt vid naturlig eller mekanisk ventilation, vilket ger korta fönster med brännbara blandningar för mindre utsläppskällor såsom fordonstankar (Berg, 2014, Groethe et al., 2007).

En vätgasexplosion i en tunnel skulle enligt experiment utförda av Groethe m fl. (Groethe et al., 2007) leda till ett mycket högre tryck än en explosion i det fria, och uppnås längs med hela tunneln. I en modelltunnel nerskalad 5 ggr gav en explosion med 30 % vätgas (1 kg) i en 37 m³ plastbehållare en tryckpuls på 150 kPa jämfört med 10 kPa i det fria. I de experiment som genomfördes med vätgasutsläpp i tunneln med ventilation blev det ingen antändning, troligtvis på grund av att vätgasen späds ut snabbt i luften. De drar slutsatsen att en tunnel ökar faran om en vätgasexplosion uppstår men att ventilationen i tunnlar drastisk reducerar sannolikheten för antändning. Ett utsläpp från en säkerhetsventil kommer att skapa för magra blandningar. Det kan dock inte uteslutas att ett större utsläpp

i en ventilerad tunnel kan skapa homogena blandningar nära stökiometriska förhållanden (Groethe et al., 2007).

3.5 Elfordon och hybrider⁶

Det finns idag flera olika typer av batteriteknologier som används i batterifordon och elhybrider. Klart dominerande i de elfordon som bara har batteri som energikälla är Li-jon-batterier, men även inom den produktgruppen finns variationer i teknik, material och typ av elektrolyt. NiMH-batterier har fortfarande en betydande andel av hybridmarknaden, men även ZEBRA (flytande metall) och blysyrabatterier används. Li-jon tekniken används dock alltmer och är av olika anledningar på väg att ta över marknaden.

De två vanligaste teknikerna som används för traktionsbatterier⁷ är Li-jon och NiMH, men eftersom NiMH inte brinner kommer det här avsnittet mestadels beröra de batterityper som samlas under beteckning Li-jon.

3.5.1 Battericellens uppbyggnad

Li-jon-batterier som används som traktionsbatterier i fordon är uppbyggda av flera celler. Den ström som uppkommer om ett batteri kopplas till en strömkrets kommer från att positivt laddade litiumjoner rör sig mellan en cells anod, genom elektrolyten (med eller utan separator) och dess katod. Batterier är uppbyggda på olika sätt och det finns olika tekniker för hur katod och anod skiljs åt, vilka material de är gjorda av och vilken typ av elektrolyt som används. Li-jon-battericeller kan delas upp i tre huvudgrupper; prismatiska celler, cylindriska celler och pås-celler.

Battericeller har oftast säkerhetsfunktioner som skall aktiveras om de befinner sig i en miljö som kan skada batteriet eller orsaka ett kritiskt haveri som brand eller explosion. De tre huvudgrupperna av battericeller har olika möjligheter för att hantera det. För att undvika explosioner och skador på omkringliggande strukturer kan celler inom de tre grupperna ventileras ut gas om det sker en tryckökning inuti dem. Separatoren som oftast är tillverkad av plast smälter dessutom när den utsätts för höga temperaturer och hindrar på så vis litiumjoner från att vandra mellan anod och katod, varpå strömmen bryts.

3.5.2 Batterisystemets säkerhetsfunktioner

Traktionsbatterier är friflytande system. Det innebär att varken deras negativa eller positiva pol är anslutna till fordonets chassi och det motverkar att det blir en sluten krets om bara en av polerna kommer i kontakt med fordonets chassi som följd av ett isolationsfel. Det finns dock alltid en kapacitiv koppling mellan en godtycklig pol och chassi som ligger mellan 50 och 200 nF. Det innebär att en beröring mellan godtycklig pol och chassi kan upplevas som en elektrisk stöt, dock utan större konsekvenser. Det innebär också att kablar kopplade till traktionsbatterier sällan orsakar brand som följd av kabelisolerings slitage och att isolationsfel mot fordonets chassi inte leder till brand. Traktionsbatterier har dessutom övervakningssystem, så kallade Battery Management Systems (BMS), som stänger av batteriet med dess huvudkontakter för att batteriet inte skall skadas eller råka ut för ett haveri. Vid kraftig extern påverkan som exempelvis brand eller en stor mekanisk åverkan hjälper dock inte BMS för att förhindra ett batterihaveri.

BMS skall koppla ned batterisystemet automatiskt vid följande fel:

- För hög temperatur
- Underspänning

⁶ Informationen under den här rubriken hämtas från (Lars Hoffmann, 2013) ”e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse”, såvida inget annat anges.

⁷ Traktionsbatteri är det energilagret som används för framdrift av fordon.

- Överspänning
- Överström
- Fel på batteriets kylsystem
- Påverkad krocksensor
- Detektion av påbörjad ”voltning” av fordonet
- Isolationsfel
- Felström, som vid till exempel ljusbågsströmmar

När batterisystemets kopplats ned på grund av ovan nämnda fel skall kraftelektronikens kommuteringskapacitans laddas ur passivt inom 5 min eller aktivt inom 2 s. Om det sker aktivt eller passivt beror på tillverkaren. Innan kapacitansen laddats ur är de orangea kablarna (till traktionssystemet) spänningssatta med minst 60 V. De orangea kablarna (Hazardous Voltage) skall alltså undvikas att klippa i då det kan finnas farliga spänningsnivåer kvar i systemet.

3.5.3 Batterikemi Li-jon

Li-jon-batterier består av en katod, elektrolyt, anod och andra avskiljande och strukturella delar och material.

Det finns huvudsakligen tre grupper av katodmaterial: litium-transitionsmetalloxid, litium-manganspinell och litiumföreningar med fosfat. För att moderera och öka li-jon-cellens termiska stabilitet dopas katoden ofta med transitionsmetaller som Ni, Al och Mn. Forskningen och användning av sådana katodmaterial har förflyttat starttemperaturen för en termisk rusning (Thermal runaway) uppåt så att de främsta materialen tål temperaturer uppemot 200-250 °C (Lars Hoffmann 2013).

Elektrolyten i li-jon batterier består i princip av en organisk vätska/lösningsmedel och ett salt som möjliggör transport av laddning med hjälp av joner inuti batteriet. Det vanligaste saltet i kommersiella Li-jon-batterier är LiPF_6 . LiPF_6 ger bästa tillgängliga kombination av egenskaper som stabilitet, ledningsförmåga och livslängd men fler tillsatser av exempelvis brandskyddande karaktär förekommer för att förbättra egenskaperna ytterligare och förhindra oönskade kemiska reaktioner som kan sänka batteriets livslängd.

Förutom att förbättra Li-jon-batteriernas driftegenskaper syftar forskningen och utvecklingen av nya material till att förhindra att batterier råkar ut för haveri, men om ett Li-jon-batteri provoceras till bristningsgränsen - mekaniskt, termiskt eller från en intern kortslutning - kan det ändå nå termisk rusning.

3.5.4 Termisk rusning

På 1990-talet gjordes de första Li-jon-batterierna med grafit som anod-material och litium-kobolt-dioxid (LiCoO_2) som katodmaterial. Katoden var dock mindre stabil än förväntat och vid provokation kunde en termisk rusning starta. Det kritiska haveriscenariot inträffar när katoden nådde en temperatur mellan 150-170 °C och började brytas ned i en exotermisk reaktion och förbrännas tillsammans med den organiska delen av elektrolyten. Detta leder till att mer värme bildas och nedbrytningen av katod och elektrolyt accelererar. Battericellens temperatur kan öka dramatiskt och antändning och/eller explosion kan inträffa om gaserna som bildats i reaktionen inte ventileras. De organiska lösningsmedlen i elektrolyten i en cell bryts också ner i en exotermisk reaktion som i vanliga blandningar med salter och brandskyddsmedelstartar vid omkring 140-190 °C (Lars Hoffmann 2013). Om inte katodmaterialet bryts ned finns dock ingen tillgång till syre och förbränning med accelererad frigöring av värme uteblir. När mycket termisk energi frigörs i en battericell värms också angränsande celler upp och skadas så att den termiska rusningen propagerar till nästa cell.

En termisk rusning följs eller utgör en del av ett brandförlopp och brandtriangeln för ett Li-jon-batteri beskrivs efter två scenarion i Tabell 10.

Tabell 10 Brandtriangeln för Li-jon-batteri

	Strukturellt intakt battericell	Brusten battericell
Syre	Syre frigörs från en överhettad katod	Syre är tillgängligt i omgivningens luft
Bränsle	Den organiska elektrolyten	Ångorna från den organiska elektrolyten och andra brännbara gaser
Värme (Energi)	Bildas i battericellen eller tillförs utifrån från en annan källa	Bildas i battericellen eller tillförs utifrån från en annan källa

När en termisk rusning uppstår bildas mycket gaser som bidrar till en tryckökning i battericellen som måste ventileras ut gaserna på det vis som beskrevs i avsnitt 3.5.2. Beroende på gasens innehåll, temperatur och förhållandena i området dit den ventileras kan det dröja olika länge innan den antänds. Vid en termisk rusning finns det dock mycket energi i närområdet, inte minst vid själva battericellen, och att fler än en eller två celler ventilerar ut gaser innan gaserna antänds är mycket osannolikt. I en batterimodul, bestående av flera celler, där någon cell befinner sig i termisk rusning sker sannolikt förbränning enligt båda brandtriangelarna som presenterats i Tabell 10 och branden innefattar sannolikt både bil och batteri inom kort om inte så var fallet från början.

Vissa batterikemier kan dock producera gaser som inte är brännbara och då kan termisk rusning utan extern brand förekomma. I de fallen blir gasernas toxicitet av stor betydelse.

3.5.4.1 Bekämpa termisk rusning

Bekämpning av termisk rusning kan göras på två sätt: förhindra att den uppstår eller avbryta alternativt minska konsekvenserna av den.

För att förhindra att den uppstår finns det en mängd säkerhetsfunktioner som presenterats. Till den listan kan dessutom fysiska barriärer läggas till som skyddar batteriet från mekanisk skada och har en avskiljande funktion mot utifrån kommande värme.

För att bekämpa en pågående termisk rusning behöver brandtriangeln på ett eller annat sätt brytas. Antingen skall syretillgången begränsas eller värmeenergin avlägsnas. Vid en termisk rusning frigörs det syre från katoden (beroende på vilket material som används) så att förbränningen kan fortgå, men med begränsad effekt jämfört med fall då elektrolyten är i kontakt med luft och med fri tillgång till syre. Genom att kyla ned battericellen kan också en termisk rusning avbrytas eller propageringen mellan celler kan snarare förhindras. Effekten av en termisk rusning är dessutom kopplat till laddningsgrad (SOC, state of charge) och en lägre laddning medför en mindre häftig termisk rusning. Det innebär också att den termiska rusningen kan bekämpas genom att batteriet laddas ur.

Ett batteripack i en bil är dock väl skyddat och svåråtkomligt. Detta gör bekämpningen av den termiska rusningen mycket svårhanterlig.

3.5.4.2 Ventilerade gaser

Vid termisk rusning bildas en hel del giftiga och potentiellt farliga gaser från nedbrytningen av elektrolyt, salt och katod samt anod. När det brinner så ändras innehållet något och då är det förbränningsprodukter som utgör den absoluta merparten av gaserna från ett havererat Li-jon batteri.

En hel del studier har gjorts för att fastställa vilka gaser som produceras vid ett batterihaveri, men den tillgängliga informationen bedöms för liten för att kunna ge en komplett bild över gasernas mängd och komposition. Vilka gaser som bildas varierar också med vilka materialval som gjorts för det aktuella Li-jon batteriet.

De gaser och ångor som ventileras ur en havererad battericell innefattar brandfarliga, toxiska och andra genom kvävning farliga ämnen som exempelvis vätgas, kolmonoxid, metan, koldioxid, vätefluorid (HF), fosforpentafluorid, alkydkarbonater (elektrolytångor) och en många andra organiska föreningar (Lars Hoffmann, 2013).

En studie gjord på li-jon-batterier i kvävgasatmosfär påvisade en mängd toxiska ämnen som är irriterande mot hud och andningsorganen. Studien kunde dock inte dra några slutsatser kring huruvida gaserna skulle nå farliga nivåer vid en verklig olycka. (Sturk et al., 2015).

En annan studie har tittat på gaser som ventilerades beroende på batteriets laddningsgrad. Studiens fokus var pås-celler (7,7 Wh, 2,1 Ah, 3,7 V) i en argonfylld atmosfär och riktades framförallt mot brandfarliga gaser. Vid 50 % laddningsgrad producerades 0,1 l gas per Wh, vid 100 % SOC producerades 0,33 l/Wh och vid 150 % SOC producerades 0,78 l/Wh. Volymfördelningen av gaserna presenteras i Tabell 11. Med koldioxid undantaget är alla gaserna brandfarliga och kolmonoxid samt flera kolväten är dessutom hälsovådliga. Nedre och övre brännbarhetsgräns för de ventilerade gasernas bestämdes till mellan 6 % och 38-40 % vid 100 % SOC respektive 150 % SOC (Colella et al., 2016).

Tabell 11 De ventilerade gasernas komposition för en 7,7 Wh påscell vid olika laddningsgrader (Colella et al., 2016).

Gas	50 % SOC [% vol]	100 % SOC [% vol]	150 % SOC [% vol]	
Koldioxid	32,3	30,0	20,9	
Kolmonoxid	3,61	22,9	24,5	
Vätgas	31,0	27,7	29,7	
Kolväten	Metan	5,78	6,39	8,21
	Etylen	5,57	2,19	10,8
	Etan	2,75	1,16	1,32
	Propylen	8,16	4,52	0,013
	Propan	0,68	0,26	2,54
	Isobutan	0,41	0,20	0,13
	n-Butan	0,67	0,56	0,39
	Buten	2,55	1,58	0,60
	Isopentan	0,45	0,07	0,036
	n-Pentan	1,94	0,73	0,30
	Hexaner	4,94	2,32	8,21
	Bensen	0,14	0,11	0,33
	Toluen	0,061	0,018	0,052
	Etyl-bensen	0,009	0,002	0,003

I en forskningsstudie från 2006, (Yang et al., 2006), utsattes battericeller med en ”typisk” elektrolytblandning⁸ för gradvis ökande temperatur för att i slutet av experimentet antända de avgivna ångorna och gaserna. Gaserna som frigjordes var de samma som de i Tabell 11 med liknande fördelning av mängden. Vid omkring 107 °C börjar LiPF₆ brytas

⁸ EC:EMC/1.2M LiPF₆. Organiska lösningsmedel i form EC (Ethyl Carbonate) och EMC (Ethyl-Methyl Carbonate) i lika delar tillsammans med salt i form av LiPF₆ med koncentrationen 1.2 mol/dm³ elektrolyt.

ned och HF bildas inuti en försluten cell. I en öppen behållare börjar processen redan vid 87 °C. Vid så här låga temperaturer går processen rätt långsamt och de avgivna gaserna domineras kraftigt av CO₂, H₂, CO samt etylen och andra kolväteföreningar. HF och andra mer främmande gaser förekommer i låga koncentrationer men är å andra sidan betydligt giftigare och har lägre toleransgränser för hälsoeffekter. Med högre temperaturer i elektrolyten ökar mängden mer hälsovådliga gaser och genereringen av HF är till exempel störst mellan 170-250 °C.

Precis som i den mer nyliga studien i kvävgasatmosfär kunde det inte dras några slutsatser kring gasproduktionen och dess hälsovådliga effekter samt brandfarlighet vid ett verkligt scenario med helt batteri i ett fordon. Vissa jämförande studier på effekterna av en brand i en bil med konventionellt bränsle och i en batteridriven bil har gjorts och franska INERIS presenterade 2016 brandprov som de genomfört för att mäta avgivna gaser från bränder i bilar med konventionellt bränsle och bilar med Li-jon-batterier (Truchot et al., 2016). Två av bilarna (bil 2 och bil 3) med konventionella drivmedel var i samma bilklass som den testade elbilen och förlorade ungefär lika mycket massa som följd av brandproven (275 kg och 262 kg jämfört med 278,5 kg för elbilen). Branden i elbilen producerade omkring 738 kg gas, för de två andra bilarna är det inte angivet. I Tabell 12 sammanfattas innehållet av de totala utsläppen. HF-produktionen vid de olika försöken har ett tydligt maximum på 350-450 ppm tidigt i brandförloppet som bedöms härstamma från förbränningen av vätska till luftkonditioneringen. Först efter omkring 30 min syns det en signifikant skillnad i uppmätta HF-mängder. Det är då batteriet blir inblandat i branden och under omkring 20-25 min mäts omkring 50 ppm HF i röken jämfört med under 25 ppm i röken från en bil med konventionellt bränsle. I ”e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse” anges att takgränsvärdet för HF är 2 ppm i medel under 15 min exponering. Dödlig koncentration under 5 min exponering ligger i spannet 50 till 250 ppm.

Tabell 12 Relativa utsläpp av ett antal olika gaser vid brandtester i bilar(Truchot et al., 2016)

	Elbil	Bil 2	Bil 3
Frätande gaser			
HCl	0,30%	0,29%	0,33%
HF	0,23%	0,11%	0,07%
HCN	0,02%	0,02%	0,05%
Kol- och kväveoxider			
CO ₂	96,98%	96,95%	97,33%
CO	1,83%	2,11%	1,94%
NO	0,12%	0,1%	0,15%
NO ₂	0,05%	0,06%	0,13%
SO ₂	-	-	-
oförbrända			
Totala kolväten	0.45%	0.37%	?

På SP har det genomförts studier fokuserade på bildandet av HF vid termisk rusning(Larsson et al., 2016). Enskilda celler utsattes för extern brand och mängden producerad HF mättes. Maxvärden för de fyra olika försöken gav 5 ppm (50% SOC), 9 ppm, 16 ppm och 100 ppm (100 % SOC). Totalt utsläpp från de enskilda försöken varierade mellan 12 och 81 mg HF/Wh. Genom att extrapolera resultaten från försök med enskilda celler och göra antagandet att alla celler i ett fordon genomgår termisk rusning och producerar lika mycket HF erhöles resultatet 1200-8000 g HF för ett batteri i storleksordningen 100 kWh. IDLH-gränsvärdet (Immediately Dangerous to Life or Health) för massenheter per volymenheter är 0,025 g/m³. Mängden HF från ett batteri skulle alltså om det fördelas homogent i en så stor volym som möjligt och om ventilation

bortses ifrån kunna ligga på skadliga eller dödliga nivåer i ett utrymme på mellan 50 000 – 300 000 m³.

3.5.5 Fordonsrelaterade scenarier

Från MSBs statistik över 40 fordonsbränder per år i parkeringshus eller större garage var flera bränder orsakade av elfel, men enbart ett fåtal, ca 1 brand årligen var orsakade av batteriladdning. 2013 började en elbil av årsmodell 1996 med nickel-kadmium brinna i ett parkeringsgarage i Helsingborg. Tre bilar blev totalt utbrända och 75 personbilar rök- och sotskadades. Bilen laddades inte när den började brinna, branden kan ha varit anlagd⁹.

Ett antal olika för elfordon specifika brandscenarier kan förutses. En brand i ett batteri startar antingen av ett internt haveri eller vid påverkan utifrån, antingen genom stort mekaniskt våld eller från kraftig värmepåverkan från en brand som börjat någon annanstans än i elbilen. Kraftigt mekaniskt våld kan exempelvis komma från en krock. Interna haverier skall hindras eller begränsas av fordonets BMS, men kan inte uteslutas. Vid laddning är sannoliken högre som följd av den belastning som battericellerna utsätts för. Särskilt vid användning av undermålig och felaktig teknik för laddning. Vid användning av rekommenderad utrustning minimeras risken även vid laddning.¹⁰

Scenarierna som kan uppstå vid en batteribrand skiljer sig åt beroende på vad som startar batterihaveriet. Till stor del handlar det om hurvida den ventilerade gasen från battericellerna antänds omedelbart efter utsläpp eller om antändningen fördröjs, men även tillförseln av energi utifrån har i ett par brandprover sett ut att påverka intensiteten av en batteribrand och total avgiven värmeenergi från den. Tillskottet från batteriet ser ut att vara större när det värms upp av en brand och avta kraftigt så snart den externa branden avlägsnats (Bobert 2013), (Long et al., 2013). En pågående brand bidrar med en antändningskälla för den gas som ventileras ut när en battericell havererar, men antändningskälla kan saknas om haveriet sker på grund av en mekanisk skada eller på grund av ett internt haveri och/eller haveri orsakat av laddning. När gasen till slut antänder kan det uppstå en explosion och i princip gäller: ju längre fördröjning från haveri till antändning desto större explosion. I de flesta fall kommer antändningen ske innan fler än två celler har ventilerat, men det går inte att utesluta att fler celler blir inblandade innan den ventilerade gasen antänds. Effekterna av en gasexplosion från ett elfordons ventilerade gaser är sannolikt mycket begränsade och bör inte skada en konstruktion, men projektiler kan vara skadliga för människor och tryckvågen kan orsaka fall som i sin tur kan vara skadliga.¹¹

Ett Li-jon-batteri som blir inblandat i en brand tillför värmeenergi genom förbränning av sin elektrolyt. I rapporten om e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse (Lars Hoffmann, 2013) anges olika elektrolytblandningars möjliga förbränningsenergi i förhållande till ett batteris elektriska energilagringsskapacitet till mellan 16-18 MJ/kWh.

⁹ <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=83&artikel=5673419>,
http://www.laddaelbilen.se/2013/10/13/elbil-brann-i-helsingborg-imorse-*update!*-18729893
[hämtad 2016-04-28]

¹⁰ I en rapport från Elsäkerhetsverket 2014 rekommenderas att undvika Mode 1-laddning med vanlig kontakt i ett standardeluttag för både enfas och trefas. HÖJEVIK, P. 2014. INFORMATIONSBEHOV RÖRANDE ELSÄKERHET KRING LADDINFRASTRUKTUREN FÖR ELBILAR. Elsäkerhetsverket. Istället rekommenderas användandet av enheter som övervakar laddningen och som kommunicerar med bilen och dess batteri. Det anses också mycket viktigt att se över elsystem dit laddaren ansluts för att undvika överbelastning och skador i det systemet (Laddat för kunskap. Laddstationer - Den kompletta guiden. 2014, Emobility.se).

¹¹ Effekterna av en explosion av gaserna från ventilerade gaser från ett li-jon batteri i termisk rusning bör utforskas och antalet celler som möjligt ventileras innan antändning sker bör fastställas genom framtida studier och försök.

Idag har li-jon batterier i fordon sällan större kapacitet än 90 kWh och hybrider oftast under 20 kWh. I framtiden kan det förväntas batterier på 100 kWh och mer i batteridrivna bilar och 100 kWh motsvarar alltså totalt 1,8 GJ tillgänglig värmeenergi genom förbränning av elektrolyten¹². Detta kan jämföras med en diesel eller bensintank om 50 l som innehåller 2 GJ förbränningsenergi.

En brand i ett elfordon ökar i intensitet när det energitäta batteriet blir inblandat i branden och framförallt när någon cell når termisk rusning och ventilerar ut brännbar gas. Även här är det osannolikt att många celler havererar och ventilerar samtidigt även om det är större chans att det händer när det är en brand runt batteriet, som påverkar och värmer upp alla celler, än när det enbart pågår en termisk rusning, som sker i en cell och påverkar de närliggande. Effektbidraget från en batteribrand har vid olika brandprover av Li-jon batterier i storleksordningen 8-16 kWh uppmätts till som mest mellan 250 kW-600 kW (Bobert, 2013), (Long et al., 2013), (Egelhaaf et al., 2014).

Sammanfattningsvis är en brand i en elbil generellt sett inte värre än en brand i en bil med konventionellt drivmedel, men det finns några punkter som kan försvåra en släckinsats:

- en termisk rusning är mycket svår att stoppa och bidrar till att branden blir svårsläckt och svår att hindra från återantändning,
- gaserna som ventileras vid termisk rusning är dels giftiga, dels brandfarliga, vilket leder till en explosionsrisk och att högre krav på skyddsutrustning kan krävas,
- ett skadat batteri kan hamna i termisk rusning många timmar efter skadan och på så sätt starta eller återantända en brand,
- en räddningsinsats av olycksdrabbade personer i en elbil måste beakta kablarna med farlig spänning för att undvika elrelaterade skador.

3.6 Garage under mark

För garage kan flera myndigheter pekats ut som ansvariga för säkerheten. Den mest uppenbara är Boverket som ansvarar för bygg- och konstruktionsregler för uppförande av byggnader. Boverkets regler tar dock ingen hänsyn till fordons drivmedel, även om en explosionslast skulle kunna ingå i en analytisk dimensionering eller vid tillämpandet av eurokoder för en byggnads bärförmåga, se nedan. Boverket menar att MSB, som har hand om regler enligt lagen om brandfarliga och explosiva varor, har ett ansvar också för gasfordon i garage. Enligt MSB faller inte fordonstankar som sitter fast i fordon under dessa regler, så länge man inte gör några ingrepp på tankarna. Fasta tankar i fordon faller, enligt MSB, under Transportstyrelsens regelverk, eftersom de föreskriver om tillstånd för vägfordon och var fordon får brukas, t.ex. begränsningar i vikt på broar.

Transportstyrelsen anser sig dock inte ha något bemyndigande att reglera säkerheten i garage, det finns inte heller några inskränkningar för, t.ex. gasdrivna fordon att köra i tunnlar eller garage. Det pågår dock ett föreskriftsarbete där Transportstyrelsen föreslår metoder för att möjliggöra bättre kontroll av bränsletankar på fordon som drivs med gas, vilket indirekt även påverkar säkerheten i garage. Transportstyrelsen hänvisar frågan om säkerhet i garage kopplat till parkerade fordon tillbaka till Boverket. Boverket lyfter även fram Arbetsmiljöverket som ställer krav på vilka nivåer av giftiga gaser och avgaser som får uppnås, t.ex. avgaser från bensin och dieselfordon. Därmed krävs en anpassad komfortventilation i garage under mark. Vidare har kommunens räddningstjänst hand om tillsyn enligt lagen om skydd mot olyckor, och kommunens byggnadsnämnd har hand om byggfrågor enligt plan och bygglagen. Kommunen har även hand om tillstånd enligt lagen om brandfarliga och explosiva varor. Dessa regler tar dock ingen hänsyn till alternativa

¹² Underlag från Buyers Guide for Electric and Plug-in Hybrid Cars. Available: http://media.greenhighway.nu/2012/05/Buyers-guide-for-electric-and-plug-in-hybrid-cars-2013_English.pdf [Accessed 09]. kompletterat med information från biltillverkarnas hemsidor, samt BU-1003: Electric Vehicle (EV) - Battery University, 2016.

energibärare. Sammanfattningsvis är det Boverket som har och tar störst ansvar för säkerheten i garage. Frågor som berör fordon med nya energibärare faller dock mellan stolarna, då Boverket, MSB och Transportstyrelsen pekar på varandra.

Det kan väntas att flertalet av byggnadstypen parkeringsgarage under mark har mellan 3 och 16 våningsplan och en verksamhetsklass motsvarande bostäder, butiker eller kontor, vilket betyder att de hamnar i byggnadsklass Br1 enligt BBR (2011). Därmed finns inga krav på tillämpningen av funktionskrav och analytisk dimensionering för garage (Gäller Br0 byggnader). Enligt § 5.44 ska risken för brand eller explosion i garage på grund av brännbara eller explosiva gaser begränsas. Förutom allmänna råd om uppvärmningssystem ges förtydliganden hur detta ska ske. Detta behöver alltså inte visas genom analytisk dimensionering, det räcker att uppfylla de preskriptiva krav som ställs. Brandbelastningen i personfordon kan väntas variera mellan 4 och 8 GJ beroende på storlek och årsmodell (Ingason et al., 2015). Med en yta på 20 m² per fordon leder detta till en brandbelastning på mellan 200 och 400 MJ/m². Detta ger brandteknisk klass EI 60 för brandcellsskiljande byggnadsdelar. Den maximala storleken på en brandsektion blir då 2500 m², 5000 m² om det finns automatiskt brandlarm, eller obegränsad om det finns en automatisk sprinkleranläggning. Brandväggar får lägsta krav REI 90-M. Garage över 50 m² ska ha två av varandra oberoende utrymningsvägar. Ytskiktet i större garage får endast ge ett försumbart bidrag till en brands utveckling. Garageutrymmet bör vara indelat i en egen brandcell. Brandcellen för ett garage kan omfatta två plan. Källare i klass Br1 byggnader ska förses med brandgasventilation eller motsvarande (BBR 5:732). Det är troligt att Arbetsmiljöverkets krav på luftkvalitet blir styrande för utformningen av ventilationssystemets kapacitet. Inga särskilda krav på ventilation med avseende på att förhindra explosion kunde identifieras. Explosion är med som en möjlig last i EKS (2011) och tillhörande Eurokoder med avseende på en byggnads stabilitet och hållfasthet (BBR19, 2011).

Enligt uppgift från MSB sker ca 2000 fordonsbränder årligen i Sverige. Utifrån inrapporterade räddningsinsatser till MSB under perioden 2011-2014 sker ca 40 årliga bränder i parkeringshus eller större garage under och ovan mark. I de fall en brandorsak är inrapporterad rör det sig oftast om anlagd brand, elfel eller tekniskt fel¹³, vilket också konfirmeras av en Nya Zeeländsk undersökning av bilbränder i parkeringsgarage (Collier, 2011). Samma studie fann att bränder i parkeringsgarage ofta är begränsade till ett fordon med en spridning till fler fordon endast i 3 % av fallen. Brandspridning till fler bilar har störst sannolikhet att ske i inneslutna garage under mark med begränsad ventilation (Collier, 2011).

Ett Europeiskt forskningsprojekt sammanställde bilbränder i garage under mark. 85 % av alla bilbränder involverade enbart ett fordon och 98 % av bränderna spred sig inte till 4 bilar eller mer (Joyeux et al., 2002). En statistikstudie genomförd i Storbritannien (BRE, 2010) visade att mer än hälften av alla bränder i parkeringsgarage inte börjat i någon bil och att det var ovanligt att dessa bränder spred sig till en bil. Enligt statistiken var det också ovanligt att en bilbrand spred sig till ytterligare bilar. Samma studie genomförde också olika brandtester och det kunde konstateras att en brand i ett inneslutet garage lätt blir ventilationskontrollerad med hög brandeffekt där spjälkning kan ske. Även om det visade sig att bilar kan stå emot höga doser av strålning innan de börjar brinna så är brandspridning mellan bilar troligt om inte bilbranden släcks utan tillåts nå maximal brandeffekt. Testerna visade att om det är en omfattande brand i en bil kan branden sprida sig till nästa bil trots en parkeringsluckas avstånd (BRE, 2010). Antal bränder per år och fordon i parkeringsgarage är uppskattad till $0,9 \times 10^{-5}$ respektive 2×10^{-5} för Nya Zeeland respektive Storbritannien (Van den Schoor et al., 2013). Sju schweiziska brandmän

¹³ Statistik tagen från ida.msb.se 2016-10-15

dödades när ett parkeringsgarage kollapsade snart efter en fordonsbrand 2004¹⁴. Ovanför garaget fanns en lekplats med träd och bänkar som rasade in i garaget.

Ett svenskt examensarbete analyserade arbetssituationen för brandmän i samband med rökdykning, där en fallstudie genomfördes av sju rökdykarinsatser i parkeringsgarage (Nordström, 2015). Rökdykarinsatserna var inte specifikt mot brand i nya energibärare utan mer inriktade mot svårigheten med rökdykning i parkeringsgarage. Parkeringsgarage upptar en stor yta vilket gör det svårt att från utsidan identifiera var branden är och vad det brinner i. Därför kan rökdykning vara nödvändigt för att komma åt och släcka branden. Långa avstånd kräver många rökdykare eftersom luften kan hinna ta slut på första rökdykarparet innan de ens hunnit fram med vatten till branden. I flera av de studerade fallen var det mycket varmt och svårt att orientera sig, även om värmekamera användes. Det blev för varmt för att kunna se några temperaturskillnader på skärmen. Värmen medför också risk för spjälkning och nedfallande bjälkar eller andra installationer i taket (t.ex. fläktar). Andra risker som uppmärksammades var schakt som var svåra att identifiera och därmed risk för fall. Det var också svårt att ventilerade ut brandgaserna, för att kunna sänka temperaturen och se bättre.

3.7 Vägtunnlar

Utifrån motsvarande EU-direktiv (EC, 2004) finns en lag och förordning om säkerhet i vägtunnlar (SFS, 2006:421, SFS, 2006:418) för tunnlar längre än 500 m på TEN-vägnätet. Transportstyrelsen har bemyndigande att reglera området säkerhet i vägtunnlar på myndighetsnivå och ger ut föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar (TSFS, 2015:27). Dessa regler tar dock ingen hänsyn till fordons energibärare. Det ligger på tunnelhållarens ansvar att se till att dessa risker hanteras. Relevant för risken för explosion är dock ett allmänt råd för longitudinell ventilation i tunnlar längre än 1000 m om att medelluftshastigheten i tunneltvärsnittet bör vara minst 3 m/s vid brandeffekter upp till 100 MW. Detta reducerar risken för att större gasmoln ska kunna skapas. Därtill har Trafikverket som ofta är tunnelhållare i Sverige sina egna tekniska krav och råd för vägtunnlar. Generellt kan sägas att en tunnelkonstruktion är väldigt robust mot brand, och även i de flesta fall explosion eftersom den går under mark eller genom berg och har ett väl tilltaget brandmotstånd (Gehandler, 2015, Kim et al., 2007, Ingason et al., 2012). De mest problematiska situationerna har inträffat vid utrymning i rök, oftast i dubbelriktade tunnlar (Ingason et al., 2015, Beard and Carvel, 2012). En mängd studier har studerat risken för gasmolnsexplosion i tunnlar till följd av ett utsläpp av gas från fordon.

Zalosh (1994) argumenterar för att CNG vid gasläckage snabbt späds ut under antändlighetsgränser. Mindre explosion kan ske under kort intervall (ca 2,2 kPa). Detta är även slutsatsen för tunnlar: *“modern tunnel environments, fanned by high-powered ventilation systems, would quickly remove and disperse gaseous fuels safely above ground in the event of an accident.”* *“the size of the flammable region from an incident involving a CNG fueled van is significantly smaller than the flammable region from a comparable incident involving a gasoline fueled van as long as the effective ventilation velocity is on the order of 0.10 m/s or higher”* (Zalosh et al. 1994). Studien ovan utgick från ett ledningsbrott på en bränsleledning från en 200 bars tank med 24 kg CNG, vilket ledde till i snitt 0.35 kg/s utsläpp under 68 s. Något större dimensioner på ledningar kan väntas för lastbilar, vilket antagligen inte kan ge några markanta skillnader i fråga om explosionsrisk. Vid utsläpp från en säkerhetsventil antas ge liknande resultat med att gasen snabbt späds ut under antändlighetsgränserna.

Weerheijm och Berg har undersökt risken för en LPG-tankbilsexplosion i tunnel. Liksom ovan krävs ett större utsläpp för att uppnå större gasmoln på grund av ventilationen.

¹⁴ <http://www.firehouse.com/news/10514192/seven-swiss-firefighters-die-in-collapsed-parking-garage> [Hämtad 2016-04-28].

Weerheijm och Berg studerade ett utsläpp av LPG i en tvåfilig tunnel med 1m/s ventilation (Weerheijm and Berg, 2014). Ett värsta fall skulle vara ett utsläpp på 5-8 kg/s vilket ger en explosiv blandning i nästan hela gasmolnet. För ett utsläpp av 60 kg gas med 6 kg/s fås ett gasmoln på 10 m med ett explosionstryck på under 1 bar, det vill säga låg risk för dödsfall på grund av explosionen. 600 kg gas kan som värst ge ett gasmoln på 100 m vilket skulle leda till en detonation vid antändning (15-20 bar), vilket i värsta fall skulle betyda att alla som vistas i tunneln avlider av explosionen (Weerheijm and Berg, 2014).

Vid högre ventilation skulle mycket större gasutsläppshastigheter krävas, vid 5 m/s minst 21 kg/s. Detta minskar sannolikheten för att ett visst gasutsläpp ska vara inom brännbar blandning för en viss tunnel. Samtidigt krävs antändning vid precis den tidpunkt då hela molnet är inom brännbarhetsgränser. Metan och väte har en högre brännbarhetsgräns än propan vilket betyder att större mängd gas då krävs. Vid en olycka i en tunnel är det troligare att antändning sker direkt än senare nedströms i tunneln där fordon har kört ut. En tidig antändning leder till en mindre explosion följt av en jetbrand vid utsläppskällan. På grund av den korta varaktigheten (ca 30 s per tank) och med tanke på tunnlar ofta väl tilltagna dimensionering av brandmotstånd (Kim et al., 2007), förutses inga större konsekvenser på tunneln från jetflamman. En annan viktig faktor är tunnelns tvärsnitt. För tunnlar med tre filer eller mer krävs ännu högre utsläppshastigheter för att få en brännbar blandning i hela tunneltvärsnittet.

Projektet HyTunnel (Kumar et al., 2009) undersökte riskerna med vätgas jämfört med bensin och CNG. En viktig riskökande faktor som identifierades var hinder i taket, såsom belysning och ventilationsutrustning som ökar risken för en övergång till detonation. Detta stöds av att huvudmekanismen som accelererar flamhastigheten är turbulens. För att generera tillräckligt mycket turbulens krävs att flamfronten kan röra sig en lång sträcka i förhållande till diametern, i storleksordningen 50-100 ggr för propan och etylen i rör. (Bjerketvedt et al., 1997). Jämfört med CNG gav vätgas en fyra gånger så kraftig explosion, under samma förhållanden. Genom experiment fann HyTunnel att en detonation krävde hinder i taket och en vätgaskoncentration över 25 %. För CNG är det inte troligt att detonation kan ske (Bjerketvedt et al., 1997). Teoretiskt kan 12 bars övertryck uppnås om all vätgas från en vätgasbuss blandas stökiometriskt med luft och antänds. Modellering av olika utsläppsscenarier med läckage från CNG eller vätgasbussar visar dock att explosionstrycket blir mycket lägre, mellan 0,1 till 0,3 bar (Middha and Hansen, 2009). En minimal tunnelventilation begränsar storleken på brännbara vätgas-luftblandningar från mindre källor såsom säkerhetsventiler. Tunnelns form påverkar också risken med vätgas. En tunnel med en hög höjd eller en hästskoformad tunnel är bättre än en kantig tunnel (Kumar et al., 2009, Berg, 2014).

Den huvudsakliga brandbelastningen i en vägtunnel utgörs av fordonen som kör i tunneln. En personbil kan väntas ge en 4 till 8 MW brand, vilket normalt inte är något större problem för personsäkerhet och egendom. Lastbilar står för den största brandbelastningen och kan leda till mycket större bränder, 10 MW plus bidrag från lasten. Uppemot 200 MW har erhållits i tunnelexperiment med syfte att efterlikna en fullastad lastbil (Ingason et al., 2015). Bidraget från fordons drivmedel är små ur ett brandsäkerhetsperspektiv. En tidig explosion orsakad av en gastank kan dock ge en snabb brandutveckling som kan leda till en problematisk utrymning. Ett snabbt explosionsförlopp är dock klart mindre troligt än en explosion orsakad av en redan befintlig brand. Gastankar för fordon ska klara mycket krockvåld och stänga av ifall ledningar börjar läcka (Berg, 2014). Tankarna utsätts för maxtryck vid tankning, då har det också skett tryckkärlexplosioner. Tankarna ska inte kunna explodera spontant vid sjunkande tryck under användning.

Det svenska METRO-projektet (Ingason et al., 2012) studerade explosioner i tågagnar inuti tunnlar. Utifrån de attacker som har skett, t.ex. Moskva, Madrid och London, noteras

att skador på tågen ofta är omfattande medan skador på tunneln är begränsade till belysning och kommunikationsutrustning. Detta trots att trycket från en explosion i stort var oberoende av om den skedde i eller utan vagn. Det kan dock väntas att tunnelstrukturen är mycket robust mot tryck eftersom den ofta omges av stora massor vatten, jord eller berg. I det fria avtar trycket med kubiken av avståndet, medan trycket i en tunnel avtar linjärt mot tvärsnittsarean. En dubbelt så stor tvärsnittsarea ledde till ett halverat tryck. Ett fullskaleförsök genomfördes där 5,5 bars tryck uppmättes, se Figur 3. Tunnelstrukturen fick endast små skador såsom avskalade betonglager. Ingen skada kunde noteras på berget bakom. Projektiler från fönster eller andra vassa föremål utgör en stor fara för människor. Härdat glas såsom tåg- och bilglas (säkerhetsglas) tål högre tryck och utgör en mindre fara jämfört med vanligt glas (Ingason et al., 2012). Sådana glas går sönder i kornformiga delar och har en plastfolie som ska hålla ihop glaset.



Figur 3 Explosion i tåg vagn fångad på bild från METRO-projektet (Foto: FOI).

För att summera, sannolikheten för en större gasmolnexplosion är mycket liten eller obefintlig beroende på att tunnelns tvärsnitt, ventilation, mängden gas och utsläppshastighet måste samspela. Tryckkärlsexplosion till följd av brand kan inte uteslutas. Kontrollen av gastankar är idag klart bristfällig, liksom brandprovningens metod för tanken. En tryckkärlsexplosion ger, liksom i det fria lokalt risker i form av strålning, projektiler och splitter, men inga större skador på tunnel, fordon eller människor globalt i tunneln. Det kan väntas att trafikanter har hunnit utrymma innan en brandpåverkan leder till en tryckkärlsexplosion. Det kan också väntas att tunnelkonstruktionen, genom den stora mängd vatten, jord eller berg som omger tunneln är mycket robust mot tryck. Tunneln introducerar således inga större risker jämfört med t.ex. explosioner i det fria.

4 Säkerhetsåtgärder

I detta kapitel sammanfattas de ovan beskrivna riskerna för garage under mark, vägtunnlar, fordon och räddningstjänst. Kapitlet beskriver sedan olika säkerhetsåtgärder som skulle kunna vidtas för att minska riskerna.

4.1 Garage under mark

Nya drivmedel för fordon introducerar nya risker för garage under mark, t.ex. innebär laddningsstationer av elfordon nya elrisker. Samtidigt utsätts elektrisk utrustning i en elbil för en snällare miljö utan förbränningsmotor. En gastank kan falla på olika sätt. Vid tryckstegring ska säkerhetsventilen lösa ut, om tryckstegringen beror på brand är det troligt att den utströmmande gasen antänds och bildar en jetflamma. Enligt UNECE R.110 ska säkerhetsventilen vara riktad för att inte ge ytterligare brandpåverkan på tanken, men i garage där bilar står tätt parkerade kan den i vissa fall träffa angränsande fordon och höja risken för brandspridning.

Vid läckage utan att en jetflamma uppstår kan en brännbar gas-luft blandning bildas. Förekomsten av ventilation i garage (dock lägre ventilation än i vägtunnlar) och den låga sannolikheten för större läckage gör att sannolikheten för gasmolnexplosion är låg. Om tanken försvagas av t.ex. en brand kan en tryckkärlexplosion ske. Eftersom vätgas och CNG förvaras under högst tryck ger de störst konsekvens vid tryckkärlexplosion. Ett efterföljande brandmoln på flera hundra kubikmeter kan väntas följa. LPG eller DME kan å andra sidan resultera i en BLEVE efter brandpåverkan som också ger ett stort brandmoln. Explosion av fordonsgastank i garage under mark kan få förödande konsekvenser för personer, räddningstjänst och egendom. På grund av en låg sannolikhet för brandspridning till fordon (Collier, 2011) är sannolikheten för explosion vid brand i ett icke-gasfordon låg, men kan troligtvis minskas ytterligare. Den mest problematiska situationen är när branden börjar i ett gasfordon. En trolig brandsorsak är då anlagd brand eller elfel, som eventuellt kan förebyggas. Fordonstankar åldras och kan försvagas relativt snabbt i svensk vägmiljö. Samtidigt är provningsstandarden för säkerhetsventiler på gastankar relativt vagt skriven vilket introducerar ytterligare osäkerheter när tanken utsätts för olika verkliga bränder. Sammantaget ökar detta sannolikheten för en tryckkärlexplosion till följd av brand.

Nordström (2015) kommer fram till att de flesta allvarliga tillbudna för brandmän i samband med rökdykning har inträffat i parkeringsgarage. Detta beror på utformning av parkeringsgaraget (stora lokaler, svårt att ventilera och orientera) samt att det vid brand i bil kan bildas stora mängder tjocka brandgaser och höga temperaturer. Situationen förvärras ytterligare i samband med att nya energibärare introduceras eftersom fler risker introduceras, inte minst risken för explosion. Räddningstjänst behandlas i mer detalj nedan.

Flertalet länder, kommuner eller landsting har restriktioner för gasfordon under mark. Kraven varierar från totalförbud till att bara första planet under mark får användas och/eller att åtgärder har tagits för att höja säkerheten i garaget eller gällande fordonen (Lönnermark, 2014). Det verkar dock svårt att säkerställa att förbud efterlevs samtidigt som det strider mot övergripande mål att introducera nya energibärare för att minska beroendet av fossila bränslen.

Säkerhetsåtgärder, utan någon bedömning av rimlighet eller kostnad-nytta, som minskar risken för gasexplosion i garage under mark följer:

- Stor rumsvolym minskar konsekvenser från explosion (notera att detta är motsatt råd för brandsäkerhet där brandcellens storlek ska begränsas).

- Tryckavlastande fönster/lättviktspanel (lättare än 10 kg/m^2 (Turgut et al., 2013)). Detta skulle ev. kunna utgöras av brandcellsavskiljande väggar. Fönster eller öppningar utåt är inte möjliga under mark.
- Byggnadskonstruktion ur explosionssynpunkt: ram i stål följt av platsarmerad betong är bäst, bärande murad/Prefab konstruktion är sämst. Bärande väggar och pelare behöver vara väl förankrade i tak för att klara att taket lyfts och sedan faller på plats.
- Privata garage minskar risken för anlagd brand.
- Avstånd mellan bilar som minskar risken för brandspridning.
- Utmärkta platser för laddning av elbilar med säkerhetsavstånd/släcksystem.
- Fast släcksystem t.ex. sprinkler samt tillgång till bärbara släcksystem t.ex. handbrandsläckare eller brandfiltar anpassade till fordon.
- Branddetektionssystem.
- Kameraövervakning för att minska anlagd brand och eventuellt detektera brand.
- För att reducera risker och underlätta för räddningstjänst skulle man kunna märka ut platser avsedda för gasbilar (Reitan et al., 2016).
- Behovsstyrd ventilation är idag anpassad till bensin och dieselprodukter. Den behöver uppdateras till gasfordon och ämnen som kan bildas från batterier. Huvudströmmen till fastighet inkl. ventilation kan brytas på grund av ett kortslutet batteri vilket gör att gaser inte kommer ventileras.

Eftersom flertalet garage redan finns och eftersom fordon byts ut snabbare än byggnader är åtgärder riktade mot räddningstjänst eller fordon att föredra framför byggnadstekniska åtgärder som är svåra att korrigera i efterhand. Byggnadstekniska åtgärder bör i första hand fokusera på publika garage där anlagd brand är mer trolig än i privata garage. En säkerhetsåtgärd som då verkar rimlig (positiv nytta enligt Collier, 2011) är fast släcksystem. Ett fast släcksystem såsom sprinkler underlättar även för räddningsinsatser. Det verkar också rimligt att redan nu anpassa eventuell behovsstyrda ventilation till alternativa drivmedels avgaser. Det bör utredas hur stora riskerna är för byggnadsras som följd av en tryckkärlsexplosion för olika typer av byggnader.

4.2 Vägtunnlar

Ur en brandsynpunkt är mindre personfordonsbränder sällan något problem. Långtradare med last står för den största brandrisken. Ur ett brandriskperspektiv är bidraget från fordons alternativa drivmedel liten. För elbilar gäller att en elbilsbrand är ett troligare scenario i tunneln än termisk rusning utan brand eftersom termisk rusning sällan uppstår under färd. En elbilsbrand kan vara svårare att släcka än en vanlig fordonsbrand, men den är inte nödvändigtvis värre med avseende på utrymning än en vanlig fordonsbrand. De flesta längre tunnlar i Sverige har longitudinell ventilation med en lufthastighet på minst 3 m/s upp till 8 m/s. Ventilationen späder ut brandgaserna, vilket leder till att personbilsfordon sällan blir problematiska.

Gasfordon introducerar tre typer av explosionsrisker. För att få en större gas-luft explosion krävs att utsläppet, tunnelns tvärsnitt, antändningskälla, tidpunkt och ventilationshastighet samspelar så att antändning sker när en större del av molnet är nära stökiometriska förhållanden. Ett drivmedelsutsläpp från en säkerhetsventil eller bränsleledning kommer vara för litet för att ge någon problematisk explosion. Det värsta scenariot skulle vara ett stort utsläpp från en gastank, där nästan all gas släpps ut samtidigt, mellan 10-40 kg/s. Ett sådant utsläpp skulle bara vara några sekunder eftersom de flesta fordonstankar inte rymmer mer gas. Sannolikheten för att utsläppet, tunneltvärsnitt, antändningskälla, tidpunkt och ventilationshastighet samspelar är väldigt liten, vilket också konfirmeras av befintlig statistik (inga inträffade gasmolnsexplosioner i vägtunnlar) och utförda experiment (Weerheijm and Berg, 2014, Berg, 2014, Groethe et al., 2007, Zalosh et al., 1994).

En spontan tryckkärlsexplosion är osannolik eftersom tanken utsätts för minskande tryck under färd. Dessutom är tankarna robusta mot krockvåld även om skadade tankar efter olycka har påträffats. En tryckkärlsexplosion eller en BLEVE som följd av brand kan dock inte uteslutas. Det kan dock förutsättas att utrymning lokalt sett hunnit ske under branden innan tanken riskerar explodera eller jetflamma uppstår. Därmed förhindras lokala skador från explosionen eller jetflamma på trafikanter. Globalt sett väntas inte explosionstrycket leda till någon större fara för människor i tunneln. En tryckkärlsexplosion från en fordons gastank utgör en liten påfrestning för tunnelstrukturen.

Sammantaget bedöms det att risken (sannolikhet och konsekvens) med alternativa drivmedel i vägtunnlar är relativt låg och inte behöver särskilda regler eller åtgärder. Räddningsinsatsen påverkas dock av risker med alternativa drivmedel, både i garage under mark och i tunnlar, se mer under kapitlet om räddningsinsats.

4.3 Fordon

Generellt gäller att preventiva åtgärder är mer effektiva än skadereducerande. En preventiv åtgärd är att minska mängden brandrelaterade elfel inom fordonsindustrin. En annan preventiv åtgärd är insatser riktade mot att minska sannolikheten för tankeexplosion av brandutsatt tank, t.ex. periodiska kontroller av tankar, säkrare utventilering av gaser, bättre brandmotstånd och provningsstandard för tankarna. Då ökar sannolikheten för att säkerhetsventilen inte behöver, alternativt hinner lösa ut. Förslag på säkerhetsåtgärder riktar sig främst mot gasfordon eftersom vi där ser de största riskerna och är:

- Bättre brandmotstånd på gastankar under rimlig insatstid.
- Bättre brandprovning av gastank som täcker in flera rimliga scenarier inklusive lokal brandexponering.
- Robusta tankar över livstid.
- Designa gastankar som vid brandpåverkan ger ett långsamt utsläpp av gas istället för snabbt och plötsligt. Troligtvis gäller detta redan för tankar av typ 4, helt i plast/komposit, under vissa förhållanden.
- Tryckavlastande plus temperaturavlastande säkerhetsventil. Undersök om tryckavlastande, temperaturavlastande eller både och är att föredra. Undersök även hur nya sensorer kan utvecklas som känner av materialförsvagning.
- Krav på periodiska kontroller av gasfordonssystem föreslås av MSB (2016b) som även anger att Sveriges Fordonsverkstäders Förening driver denna fråga. Periodiska besiktningar utförs t.ex. i USA och Iran med till synes positiva resultat jämfört med andra länder med många CNG fordon.
- Märkning av fordon. Arbete pågår inom ISO.
- Minska antalet elrelaterade fordonsbränder, t.ex. bränder som startat i instrumentpanelen, genom säkrare fordonsdesign (MSB, 2016b).

Periodiska kontroller av fordons gastankar verkar högst rimlig. En sådan kontroll bör enligt Jönsson (2003) baseras på en yttre visuell inspektion för att hitta sprickor, korrosion och skador på tanken. Provtryckning rekommenderas inte som metod eftersom det dels kan leda till nya skador på tank och gassystem och dels inte alltid fångar upp skadade tankar (Jönsson, 2003). Framtida forskningsprojekt krävs för att förbättra befintlig brandprovning och utvärdera alternativa brandskyddssystem för gastankar. En smart elteknisk design och tankar som håller under sin livstid är kvalitetsfrågor för fordonsindustrin.

4.4 Räddningsinsats

En olycka som involverar ett fordon med nya energibärare ska i stort hanteras på samma sätt som en olycka med bilar som drivs med traditionella energibärare. Det finns dock några aspekter som räddningstjänsten ska beakta när fordon med nya energibärare är inblandade i en olycka. För att ta reda på om fordonet drivs med nya energibärare kan appen ”fordonkoll” (svenskt registreringsnummer) eller ”CRS” Crash Recovery System (även utländska registreringsnummer) användas. Detta kräver dock att man kan identifiera registreringsnumret, vilket inte alltid är möjligt. I dagsläget är det dock inte många räddningstjänster som är anslutna till denna service. I framtiden kommer det finnas en standard för att märka upp bilar med vilken energibärare de har. Denna märkning är en del av arbetet med ”ISO 17840 Road vehicles – information for first and second responders.” Standarden kommer komma ut i fyra delar där de två första handlar om hur ett säkerhetsblad ska utformas för att ge nödvändig information hur räddningstjänsten snabbt och säkert kan rädda nödställda personer, dels för bilar (del 1) och dels för tunga fordon (del 2). Del 3 är en mer utökad räddningsguide som fungerar som en förlängning av säkerhetsbladet. Del 4 specificerar hur symbolerna ska se ut för att räddningstjänsten snabbt och enkelt ska kunna identifiera vilken energibärare det är.

Större vägtunnlar är ofta kopplade till trafikledningspersonal som har kameraövervakning i tunnelarna. Här finns det möjlighet för räddningstjänsten att få mer information om olyckan och inblandade energibärare innan de kommit på plats. Även garage kan ha övervakningskameror som kan underlätta i räddningstjänstens arbete. Räddningsledaren på plats ska alltid göra en riskbedömning innan olika taktiska metoder ska genomföras vid en räddningsinsats. Enligt arbetsmiljöverket (AFS 2007:7) ska invändig släckning genom rökdykning endast genomföras vid livräddande insats och utvändig brandbekämpning bör övervägas som första alternativ. På grund av stora avstånd kan det dock vara svårt att eftersträva brandsläckning från utsidan och invändig brandsläckning är oftast en nödvändighet.

I tunnlar arbetar Trafikverket med motsträviga mål, dels utrustas tunneln med handbrandsläckare för att trafikanter ska kunna göra en första insats, dels är taktiken vid utformning av tunneln att alla ska utrymma så fort som möjligt. De ser risker med att trafikanter tar för stora risker (Lundström¹⁵). Samtidigt är det vid det tidiga brandförloppet som det går att påverka förloppet mest och mycket tid kan vinnas genom att genomföra en först insats med t.ex. en handbrandsläckare. På marknaden har det också börjat komma brandfilter för fordon där man snabbt kan slänga över en filt innan man utrymmer. På så sätt kan förloppet saktas ner och vinna tid inför räddningstjänstens ankomst. Utveckling på fordonsbrandfilter sker med starkare material i filten som även skulle kunna stå emot splitter. Dessa brandfilter kan t.ex. finnas i bilar, parkeringsgarage eller tunnlar. Semi-professionell personal som väktare kan ha utbildning i hur dessa kan hanteras, men de bör även finnas tydliga instruktioner så att allmänheten också kan genomföra en första insats (Palmkvist¹⁶).

4.4.1 Räddningsinsats mot ett elfordon

I kapitel 3.5 som behandlar elfordon och hybrider beskrivs de risker som är speciella för en elbil eller hybrid. Informationen under den rubriken har hämtats från (Lars Hoffmann, 2013). Rapporten skrevs i samband med ett trippelhelixprojekt (samarbete mellan industri, akademi och myndighet) som hette räddningskedjan¹⁷. Projektet mynnade ut i en kunskapsöversikt som sammanfattar rekommendationer och ”att tänka på” vid

¹⁵ Ulf Lundström, Trafikverket, workshop om tunnlar 8 nov 2016.

¹⁶ Krister Palmkvist, erfaren räddningsledare, workshop om tunnlar 8 nov 2016.

¹⁷ <https://www.msb.se/sv/Insats--beredskap/Brand--raddning/Trafikolycka/Raddning-e-fordon/>

trafikolyckor med e-fordon. I bloggen ”Räddning e-fordon”¹⁸ finns en utbildningsfilm på vilka säkerhetsåtgärder som bör vidtas eller inte vidtas vid en olycka. Kortfattat kan rekommendationerna sammanfattas i följande punkter:

- Vid en olycka ska bilens säkerhetssystem bryta kopplingen mellan traktionsbatteriet och kraftelektroniken, men som en extra säkerhetsåtgärd ska tändningen stängas av och 12-volts batteri kopplas bort. Detta för att försäkra sig om att bilen inte kan köra iväg (svårt att höra om systemet är igång eller inte till skillnad från en brummande förbränningsmotor).
- Om bilen står på laddning ska kontakten dras ur stolpen/väggen.
- Serietillverkade elfordon efter 1997 har alltid orange kablage som nästan alltid sitter i chassit vilket gör det riskfritt att klippa i stolpar. Bändare med stöd i baksätets rygg ska dock undvikas då det förekommer batteriplacering bakom ryggdynan.
- Det är riskfritt att vada eller dyka till ett elfordon för att rädda passagerare. Spänningsförande delar i batteriet bör dock inte öppnas eller röras vid under vatten.
- Elfordon av årsmodell 2012 och senare har uteslutande litiumbatterier där batteriväskan inte är frätande, men brännbar.
- Vid brand ska brandgaserna ventileras bort för att minska koncentrationen av brandfarliga och hälsofarliga brandgaser. Sedan ska flammor slås ned och bilen kylas (kan kräva stora mängder kylmedel). Om batteriet inte visar kraftig rökutveckling och att temperaturen sjunker kan fordonet flyttas från platsen. Temperaturen kontrolleras med hjälp av värmekamera.
- Om temperaturen i battericellerna blir högre än 190 °C och försätter att öka kan termisk rusning uppstå, se kapitel 3.5.4.
- Dimspik/skärsäckare ska inte användas i batteripack.
- Förmedla till de som tar hand om bilen efter avslutad räddningsinsats att det finns risk för återantändning i batteriet som bör placeras så att inte en andra brand kan orsaka skada.

Detta projekt kunde inte styrka att elbilar skulle innebära en förhöjd risk vid brand under mark. Ett problem kan dock vara att det kan krävas mer släckmedel för att släcka. Kontaminerat släckmedel måste tas om hand för att inte orsaka miljöskador. Ett annat utforskat område är giftigheten i brandgaserna. Diskussionen kom upp i båda workshoparna om dagens branddräkt är dimensionerad för att skydda mot den giftiga brandröken. Det finns inget som idag styrker att brandrök från elbil skulle vara giftigare än brandrök från konventionella fordon, men det finns heller inget som bevisar att dagens branddräkt är tillräckligt säker för skydda brandmän från giftiga rökgaser från ”vanliga” bilar. Vätefluorid är ett giftigt ämne som kom upp i diskussionen från workshopen. Vätefluorid bildas vid fordonsbränder, men kan också bildas vid rusning av batteri och kan därmed vara svårt att upptäcka.

4.4.2 Räddningsinsats mot ett gasfordon

Ett allmänt problem med gastankar vid fordonsbrand är att räddningstjänsten inte vågar ta en offensiv taktik och gå fram och påbörja släckning utan väljer en defensiv taktik och spärrar av området och låter branden brinna ut. Detta är problematiskt för tunnlrar och garage under mark eftersom det ökar risken för att branden sprider sig och påverkar övriga delar av konstruktionen (Lindström och Palmkvist¹⁹). För att minska risken för explosion är fordongasbilar försedda med smältsäkring som löser ut vid 110 °C. Den är

¹⁸ <http://e-fordon.blogspot.se/>

¹⁹ Peder Lindström och Krister Palmkvist, erfarna räddningsledare, workshop om parkeringsgarage 20 september 2016.

placerade nära flaskventilen och ger ett relativt pålitligt skydd mot kärlsprängning vid uppvärmning. Problemet är att den jetflamma som kan uppstå när smältsäkringarna löser ut kan antända närliggande objekt. Om jetflamman skulle träffa en gastank på t.ex. ett annat gasfordon kan en tryckkärlexplosion uppstå då branden påverkar gastanken lokalt och inte i ändarna där smältsäkringarna finns placerade (MSB, 2016b). Detta är dock ett mindre troligt scenario i dagsläget då fordonsflottan av gasbilar inte är så stor och risken är minimal för att två gasbilar skulle vara placerade intill varandra. Vidare är inte tryckavlastningen riktad så att den kan få en direkträff på en tank som dessutom inte sitter exponerat från sidan i en bil. När det gäller större fordon som bussar eller lastbilar finns det dock en liten risk att det här skulle kunna ske.

MSB utkom i mars 2016 med en handbok för att vägleda räddningstjänsten i hantering av gasdrivna personbilar på olycksplats, både inomhus och utomhus (MSB, 2016a). Kortfattat föreslår MSB en het zon²⁰ på 10 m kring bilen vid en trafikolycka. Vid brand i kupén där ingen jetflamma förekommer föreslås 50 m eftersom explosion kan uppstå. Skyddsutrustning som ska bäras i het zon är branddräkt, tryckluftapparat och explosimeter. Ex-klassade kommunikation och belysning behövs. Vid brand i kupé ska dessutom aktiva hörselskydd och skyddsglasögon bäras.

För brand i personbil inomhus (t.ex. garage) rekommenderar MSB att insats i första hand ska göras utifrån utan inträning i byggnad om det inte är konstaterat att invändig insats är nödvändig för att rädda liv. Om invändig insats ska genomföras är det viktigt att öppna alla öppningar för att tryckavlasta i största möjliga mån. Som extra skyddsutrustning inomhus rekommenderas ett fordon med splitterskydd som tål värme, luftstötstång och fallande bjälklag. Om möjligt ska avloppet från parkeringshuset stängas av. Släckning sker genom kylning med vatten. Även pulver eller CAFS kan användas för släckning i kupén men inte användas till kylning. Jetflamma ska aldrig släckas utan låta brinna ut och det är viktigt att mäta koncentrationen av gas i högpunkter under bakvagn samt i kupé och motorrum samt lyssna till pysande ljud som kan indikera en läcka. Mer utförlig beskrivning finns beskrivet i MSB:s vägledning.

2015 exploderade totalt 5 brandutsatta gastankar på en sopbil i Indianapolis i USA. Tankarna hade smältsäkringar i var ände och uppfyllde Amerikanska standarder. En bidragande orsak till att de exploderade ska ha varit att smältsäkringar kylades med vatten av räddningstjänst (MSB, 2016b). När en fordonsbrand exponerar gastankar är det oklart om räddningstjänst ska försöka släcka branden eller inte. Detta beror främst på att smältsäkringar kan kylas så att sannolikheten för en tankexplosion ökar (MSB, 2016b).

Efter avslutad insats kan det finnas brandpåverkade gastankar som ej har löst ut. Dessa behöver tas om hand säkert. Beroende på materialet i gastanken och hur brandexponerade tanken har varit finns olika risker med att ta hand om flaskan och elda upp gasen. Ett vanligt förfarande är att skjuta hål på tanken. Detta medför en del risker inklusive utsläpp av obränd gas. Det bör undersökas om inte gastankar av typ 1 i stål kan tas om hand utan någon större risk. Vid tillverkning härddas flaskan i 900 °C vilket gör stålet starkare. Vid branden har temperaturen i stålet troligtvis som högst varit 500 °C eftersom tanken inte har exploderat. När gastanken sedan kylts igen bör man kunna vara minst lika säker på att den inte kommer att explodera som vilken annan fordonsgastank som helst eftersom trycket i flaskan är lägre och stålet är starkare än det var under branden.

²⁰ Vid räddningsinsatser brukar man dela in området i kall, varm och het zon där de olika zonerna representerar olika säkerhetsåtgärder.

5 Diskussion

Den förhöjda explosionsrisken som gasformiga drivmedel medför ska vara kompenserad av säkerhetssystem som reducerar risken för utsläpp och tryckkärlsexplosion. Det är dock osäkert om detta gäller över huvudtaget, och framförallt huruvida det gäller för parkeringsgarage. Flertalet olyckor har skett där säkerhetssystem inte fungerat som de ska. Det finns dessutom oklarheter kring hur kontroll och underhåll ska ske över tid i praktiken, samt gällande, t.ex. hur väl brandprovningsstandarder överensstämmer med olika verkliga bränder. Utifrån några inträffade händelser och MSBs senaste rapport om risker med gasfordon är det klart att räddningstjänst är osäker gällande explosionsrisken vid brand i gasfordon och hur den här typen av bränder ska hanteras. Har tankar som exploderat gjort detta på grund av att smältbleck har kylts av släckinsatsen eller skulle de ha exploderat ändå? Behövs en annan typ av gassystem och hur ska det i så fall designas för att en släckinsats ska kunna genomföras med relativt god säkerhet?

En annan stor osäkerhet i kunskapsöversikten berör vilket skick som kan väntas på olika sorters gasfordonstankar. När de utsätts för brandprov är tankarna nya och klarar sitt designtryck. Säkerhetsventilen är alltså dimensionerad utifrån detta. Sedan utsätts de för en korrosiv miljö och ibland även stötar eller krockar. Deras livslängd i praktiken är högst osäker. Minst två tankar har exploderat i Sverige vid 230 bars tryck. Det kan finnas en stor andel tankar som inte lever upp till designtrycket. En stickprovsanalys hade kunnat ge en bättre bild över läget och olika typer av tankar.

Det finns en diskrepans mellan hur risker med gaser hanteras i allmänhet och hur risker med gaser i fordon hanteras när de parkeras inomhus. Enligt FM Global ska vätgas inte förvaras inomhus och man kan undra varför gasolflaskor i garage under lägenheter hanteras annorlunda om de är lösa eller sitter fast i en bil. Gastankar i bilar har till skillnad från gasolflaskor krav på säkerhetsventil. Å andra sidan utsätts fordonstankar för en tuffare miljö. Gasflaskor har vi ofta mer erfarenhet av och för dem finns mer anpassade regler kring hanteringen än för fordonskastankar.

Fysikalisk data för ämnen, brand- och explosionsegenskaper är relativt väl kartlagda. Explosionstrycket i en garagemiljö kan grovt uppskattas men lokalt mycket högre tryck kan väntas beroende på tankens placering och reflektion från väggar, tak och golv. Konsekvenser från en explosion i olika byggnadstyper av garage under mark kan väntas variera mellan totalförstörd och raserad byggnad som även påverkar omgivningen till mer lokala skador. Det finns dock stora osäkerheter och kunskapsluckor vid tryckkärlsexplosioner i olika stora garage under mark och deras konsekvens för strukturen. Det kan väntas att trafikanter hunnit utrymma innan en brand orsakar en tryckkärlsexplosion eller bildar en jetflamma utan riskerna är snarare på räddningspersonal som ska genomföra släckinsats.

För tunnlrar innebär eldrivna eller gasformiga fordon inga markanta risker jämfört med konventionella fordon med avseende på konstruktionen. Däremot kan trafikanter ha svårare att utrymma om läckage eller brand skulle uppstå på grund av en krock och i och med det riskera att utsättas för explosion eller jetflamma.

Utifrån diskussioner från båda workshoparna kan kvalitetsproblem med gastankar vara en del av ett större problem inom fordonsindustrin. En bils kvalitet, säkerhet och livslängd ska kontrolleras genom typgodkännande. Det verkar dock som att det finns brister med detta i stort egenkontrollerande system, utifrån de brister med olika bilmodeller som finns på marknaden. Typgodkännandet ger idag ingen garanti för att ett fordon har en hög kvalitet och är säkert. En annan osäkerhet som diskuterades är att det inte finns några tydliga säkerhetsramar som man vet att nutida och framtida fordon ligger inom. Därmed är det svårt att veta vilka risker väginfrastrukturen ska designas för. En tredje fråga som

lyftes var att trafikanter borde känna till och kunna släcka de fordon som de kör. Detta gäller inte minst yrkeschaufförer som bör veta hur man ska släcka en brand och utrymma en vägtunnel. Då kan de hjälpa andra bilister. Denna fråga påverkar inte minst räddningstjänstens insats eftersom det är större chans att släcka ett fordon i tidigt skede av branden än ett senare när räddningstjänsten är på plats. Räddningstjänsten är idag mycket osäkra på sin arbetsmiljö och de risker som finns med fordonens nya energibärare och då särskilt när de befinner sig i slutna utrymmen så som tunnlar eller garage under mark. Osäkerheten yttrar sig i risken för explosion, risken för att bli träffad av en jetflamma samt risken att utsätta sig för giftiga brandgaser. Det är därför viktigt att undersöka dessa risker men också att utveckla metoder för att släcka bränder utan att behöva utsätta sig för giftig brandrök.

6 Rekommendationer och framtida forskning

Bensin och diesel har idag en väl beprövad hantering som är relativt säker. Däremot så är inte minst läckande bensin en orsak till att många fordonsbränder sker efter fordonsolyckor (Machiele, 1990). Det kan väntas att alternativa drivmedel i form av gas eller el kommer att leda till mindre läckage som antänds och därmed färre fordonsbränder över lag (Coen, 2010, Berg, 2014).

Gasfordon introducerar dock en ny dimension i skadefallet, nämligen explosion, antingen till följd av tryckkärlsexplosion eller vid antändning av gas-luft blandningar. Dessutom tillkommer risken att träffas av jetflamma. Risken för att människor ska träffas av en jetflamma eller vara i närheten av en explosion är större i tunnlar då skadefallet oftast beror på en krock. I garage antas människor hinna utrymma innan en brand orsakar en jetflamma eller ännu värre en explosion. Jetflamman kan dock öka risken för brandspridning till angränsande fordon i garage där bilar står tätt parkerade.

På konstruktionen väntas inte en explosion ge några betydande effekter för tunnlar då mängden gas är liten relativt tunnelns volym och bärförmåga. För garage under mark är risken från gasfordon mer kritisk. Sannolikheten för ett tankbrott till följd av en brand kan inte negligeras. Konstruktionsfel och brister i kontroll kan inte uteslutas och även en tank som uppfyller alla krav och tester kan explodera vid en verklig brand. Skadefallet berör egendom, brandmän och privatpersoner i garaget och eventuellt ovanför garaget. Denna fråga faller mellan stolarna hos berörda myndigheter. Boverket hänvisar till MSB som hänvisar till Transportstyrelsen som i sin tur hänvisar tillbaks till Boverket.

Konsekvensen från elfordon anses vara jämförbar med konventionella fordon. Dock introducerar laddningen en ny källa till brand som inte konventionella fordon och gasfordon har²¹. En termisk rusning, även om den inte orsakar eller orsakats av en brand, producerar dessutom giftiga gaser, bland annat vätefluorid i potentiellt mycket skadliga mängder.

Sammantaget kan en framtid med flertalet bilar på laddning och flertalet gasfordon i garage under mark skapa en klart problematisk situation med en förhöjd sannolikhet för brand genom laddning och ett ökat skadefall och insatsproblematik i och med gastankar. Sannolikheten för spridning av brand mellan ett elfordon till ett gasfordon och mellan två gasfordon är dock relativt liten (gissningsvis under 15 %), och kan begränsas ytterligare genom en smart utformning och placering av elladdningsstationer. Eftersom risken för brandspridning mellan fordon är relativt låg rekommenderas en insats på att höja brandsäkerheten för gasfordon, mot elfel och anlagd brand, men även genom gastankar som är robusta mot brand och slitage och som har robusta säkerhetsventiler som hinner lösa ut vid de olika brandscenarier som kan väntas. Brandspridning kan begränsas med sprinkler som även möjliggör en säkrare defensiv räddningsinsats.

Regler behöver anpassas till en framtid med alternativa energibärare. Detta berör inte minst Arbetsmiljöverket och regler för ventilation som behöver trigga på de gaser som kan avges från t.ex. gasfordon och elfordon, t.ex. metan, vätgas och vätefluorid. Samt Transportstyrelsens ansvar att periodiskt kontrollera skicket på fordonstankar för att minska risken för tryckkärlsexplosion.

²¹ Helelektriska fordon saknar dock vätskeformiga och gasformiga bränslen samt heta ytor som läckage kan antända mot och har på så sätt färre brandkällor än fordon med förbränningsmotorer.

6.1 Säkra gastankar på fordon

Med ett helhetsgrepp på gastankssystemet inklusive tank och säkerhetssystem kan systemet optimeras ur ett säkerhetsperspektiv. Systemet bör kunna designas mer robust mot en tryckkärlsexplosion till följd av brand än det är idag:

- Förbättra standard för brandprov av gastankar.
- Utför periodiska besiktningar för fordonsgastankar i Sverige.
- Undersök om/hur tryckavlastande säkerhetsventil eller andra sensorer tillsammans med smältbläck kan hindra tankbrott vid olika brandexponeringar.
- Undersök rimlighet med att kräva brandmotstånd på fordonsgastankar.
- Undersök risken för brandspridning mellan fordon på grund av jetflamma.
- Undersök om tankar kan konstrueras så att de ger ett långsamt utsläpp istället för ett snabbt och plötsligt vid brandpåverkan.

6.2 Säkra garage under mark

Det bedöms som att osäkerheterna är stora vid en tryckkärlsexplosion av fordonstank i olika typer av garage. Troligtvis kan kritiska byggnadstyper identifieras som riskerar att rasa.

- Undersök kostnad/nytta med att kräva sprinkler av publika garage under mark (Troligtvis positiv enligt (Collier, 2011))
- Behovsstyrd ventilation för garage måste inkludera gaser från gas- och eldrivna fordon.
- Ytterligare studier krävs för att undersöka konsekvenser för typiska byggander med garage under mark vid en tryckkärlsexplosion av fordonsgastank i garaget.

6.3 Riktlinjer och framtida forskning för räddningstjänst

Även här är osäkerheterna idag betydande. Inte minst gäller detta riktlinjer vid brand i gasfordon. Ska tanken kylas eller inte? Det är också stora osäkerheter vad gäller giftigheten i brandgaserna och hur det påverkar brandmännen.

- Bränder i undermarksanläggningar kan vara svåra att bekämpa från utsidan och det kan krävas en lång aktionstid vid insats därför bör det undersökas hur syrgas kan förbättra aktionstiden.
- Värmekamera är ett nödvändigt verktyg för att orientera sig i undermarksanläggningar men det är begränsande att behöva använda sig av handhållen enhet. Undersök därför hur handhållning av värmekamera kan förbättras genom placering på hjälmen.
- Undersök giftigheterna i brandgaser dels i vanliga bilar, dels i elbilar samt undersök hur väl en branddräkt skyddar brandmän mot denna rök.
- Ta fram riktlinjer för riskbedömning och metodik vid släckning av brand i gasfordon.

7 Referenser

- BAKER, W. E., COX, P. A., KULESZ, J. J., STREHLOW, R. A. & WESTINE, P. S. 1982. *Explosion hazards and evaluation*, New York, Elsevier Scientific Publishing Company.
- BBR19 2011. Boverkets byggregler (t.o.m. BFS 2011:26). Karlskrona: Boverket.
- BEARD, A. & CARVEL, R. (eds.) 2012. *The Handbook of tunnel fire safety*, London: ICE Publishing.
- BERG, T. 2014. Analys av vätgassäkerhet i tunnlar och undermarksanläggningar. Borås, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden.
- BJERKETVEDT, D., BAKKE, J. R. & VAN WINGERDEN, K. 1997. Gas explosion handbook. *Journal of Hazardous Materials*, 52, 1-150.
- BRE 2010. Fire spread in car parks: BD2552.
- BOBERT, M. 2013. 3P02888-02 Brandprov på Li-Ion batterier. Borås, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden.
- COEN, D. 2010. *Nya energibärare i fordon – deras påverkan på tunnlar och undermarksanläggningar vid brand*. M.Sc., Luleå tekniska universitet.
- COLELLA, F., BITEAU, H., PONCHAUT, N., MARR, K., SOMANDEPALLI, V., HORN, Q. & LONG, R. T. 2016. Electric vehicle fires. In: INGASON, H. & LÖNNERMARK, A. (eds.) *Proceedings from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS 2016)*. Montréal, Canada: SP Technical Research Institute of Sweden.
- COLLIER, P. 2011. Car parks - Fires involving modern car and stacking systems. New Zealand: BRANZ.
- CRUICE, W. J. 1991. Explosions. In: COTE, E. (ed.) *Fire Protection Handbook*. Fourth ed. Quincy, MA, USA: NFPA.
- EC 2004. Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. Brussels: European Commission.
- EGELHAAF, M., WOLPERT, D. & LANGE, T. 2014. Fire Fighting of Battery Electric Vehicle Fires. Stuttgart.
- EKS-8 2011. Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpningen av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder). Karlskrona: Boverket.
- FMGLOBAL 2012. Property Loss Prevention Data Sheets 7-91.
- FORTH2 1991. Fortifikationshandbok del 2. Stockholm, Sweden: Överbefälhavaren.
- FUJIMOTO, K. 2007. DME Handbook. Tokyo: Japan DME Forum.
- GEHANDLER, J. 2015. Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews*, 4.
- GROETHE, M., MERILO, E., COLTON, J., CHIBA, S., SATO, Y. & IWABUCHI, H. 2007. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2125-2133.
- HYSAFE 2009. Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces - results from InsHyde Deliverable D113 of HySafe.
- HÖJEVIK, P. 2014. INFORMATIONSBEHOV RÖRANDE ELSÄKERHET KRING LADDINFRASTRUKTUREN FÖR ELBILAR. Elsäkerhetsverket.
- INGASON, H., KUMM, M., NILSSON, D., LÖNNERMARK, A., CLAESSEON, A., LI, Y. Z., FRIDOLF, K., ÅKERSTEDT, R., NYMAN, H., DITTMER, T., FORSÉN, R., JANZON, B., MEYER, G., BRYNTSE, A., CARLBERG, T., NEWLOVE-EICSSON, L. & PALM, A. 2012. The METRO Project: Final report. Västerås, Sweden: Mälardalen University.
- INGASON, H., LI, Y. Z. & LÖNNERMARK, A. 2015. *Tunnel Fire Dynamics*, New York, Springer.
- JOYEUX, D., KRUPPA, J. & CAJOT, L.-G. 2002. Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings EU.

- JÖNSSON, O. 2003. PROVNING AV TRYCKBEHÅLLARE FÖR NATURGAS OCH BIOGAS I FORDON. Svenskt Gastekniskt Center.
- KIM, H. K., LÖNNERMARK, A. & INGASON, H. 2007. Comparison and Review of Safety Design Guidelines for Road Tunnels. SP.
- KUMAR, S., MILES, S., ADAMS, P., KOTCHOURKO, A., HEDLEY, D. & MIDDHA, P. HyTunnel Project To Investigate The Use Of Hydrogen Vehicles In Road Tunnels. 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Sept. 16-18 2009 Ajaccio-Corsica, France.
- LARS HOFFMANN, D. S. 2013. e-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehändelse. Borås: SP.
- LARSSON, F., ANDERSSON, P., BLOMQVIST, P. & MELLANDER, B.-E. Gas Emissions from Lithium-Ion Battery Cells Undergoing Abuse from External Fire. Fourth International Conference on Fire in Vehicles, 2016 Baltimore, USA. SP, 253-256.
- LONG, T., BLUM, A., BRESS, T. & COTTS, B. 2013. Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results. Quincy: The Fire Protection Research Foundation.
- LOWELL, D. 2013. Natural Gas Systems: Suggested Changes to Truck and Motorcoach Regulations and Inspection Procedures. U.S. Department of Transportation.
- LÖNNERMARK, A. 2014. New Energy Carriers in Tunnels. In: INGASON, H. & LÖNNERMARK, A. (eds.) *Proceedings from the Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS 2014)*. Marseille, France: SP Technical Research Institute of Sweden.
- LÖNNERMARK, A., VYLUND, L., INGASON, H., PALM, A., KRISTER PALMKVIST, KUMM, M., FRANTZICH, H. & FRIDOLF, K. 2015. Rekommendationer för räddningsinsatser i undermarksanläggningar. SP Technical Research Institute of Sweden.
- MACHIELE, P. A. 1990. Summary of the Fire Safety Impacts of Methanol as a Transportation Fuel. *SAE Paper 901113*.
- MAGNUSSON, J. 2007. *Structural concrete Elements Subjected to Air Blast loading*. Licentiate, KTH, Sweden.
- MIDDHA, P. & HANSEN, O. R. 2009. CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 5875-5886.
- MSB 2016a. Räddningsinsats med gasdrivna bilar.
- MSB 2016b. Gasdrivna fordon – händelser och standarder.
- NAITO, M., RADCLIFFE, C., WADA, Y., HOSHINO, T., LIU, X., ARAI, M. & TAMURA, M. 2005. A comparative study on the autoxidation of dimethyl ether (DME) comparison with diethyl ether (DEE) and diisopropyl ether (DIPE). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 469-473.
- NORDSTRÖM, J. 2015. *Ett MTO-perspektiv på rökdykning: Arbetsuppgiften, tillbud och olyckor*. Magisterexamen, KTH.
- PERRETTE, L. & WIEDEMANN, H. K. CNG buses safety : learnings from recent accidents in France and Germany. Society of automotive engineer world Congress, Apr 2007 2007 Detroit, United States.
- REITAN, N. K., BØE, A. G. & STENSAAS, J. P. 2016. Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom. SP Fire Research AS.
- SFS 2006:418. Lag om säkerhet i vägtunnlar (t.o.m. SFS 2010:1573). Socialdepartementet, Regeringskansliet.
- SFS 2006:421. Förordning om säkerhet i vägtunnlar (t.o.m. SFS 2010:1608). Stockholm: Sveriges Regering.
- SFS 2010:900. Plan- och bygglag (PBL) (t.o.m. SFS 2012:444). Socialdepartementet, Regeringskansliet
- SFS 2011:338. Plan- och byggförordning (PBF) (t.o.m. SFS 2011:819). Socialdepartementet, Regeringskansliet.

- STURK, D., BERGSTRÖM, U., GUSTAFSSON, Å., HÄGGLUND, L., LEJON, C. & TENGEL, T. 2015. Undersökning av ventilerade gaser och aerosoler från litiumjonbatterier av typen LFP och NMC i kvävgasatmosfär. FOI/MSB.
- TRUCHOT, B., FOUILLEN, F. & COLLET, S. An experimental evaluation of the toxic gas emission in case of vehicle fires. Proceedings from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security, Montréal, Canada, March 16-18, 2016, 2016 Borås. SP, 419-429.
- TSFS 2015:27. Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar m.m. Karlskrona: Transportstyrelsen.
- TURGUT, P., ARIF GUREL, M. & KADIR PEKGOKGOZ, R. 2013. LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 32, 220-235.
- UNECE 2014a. Global Technical Regulation No.13 (Hydrogen and fuel cell vehicles) *In: EUROPE, T. U. N. E. C. F. (ed.)*.
- UNECE 2014b. Regulation No. 34 - Prevention of fire risks. *In: EUROPE, T. U. N. E. C. F. (ed.)*.
- UNECE 2014c. Regulation No. 67 - LPG vehicles *In: EUROPE, T. U. N. E. C. F. (ed.)*.
- UNECE 2014d. Regulation No. 110 - CNG and LNG vehicles *In: EUROPE, T. U. N. E. C. F. (ed.)*.
- UNECE 2014e. Regulation No. 134 - Hydrogen and fuel cell vehicles. *In: EUROPE, T. U. N. E. C. F. (ed.)*.
- USFA 1993. The World Trade Center bombing: Report and analysis. New York: U.S. fire Administration.
- VAN DEN SCHOOR, F., MIDDHA, P. & VAN DEN BULCK, E. 2013. Risk analysis of LPG (liquefied petroleum gas) vehicles in enclosed car parks. *Fire Safety Journal*, 57, 58-68.
- WEERHEIJM, J. & BERG, B. 2014. Explosion risks and consequences for tunnels. *In: INGASON, H. & LÖNNERMARK, A. (eds.) Proceedings from the Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS 2014)*. Marseille, France: SP Technical Research Institute of Sweden.
- VENETSANOS, A. G., BARALDI, D., ADAMS, P., HEGGEM, P. S. & WILKENING, H. 2008. CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21, 162-184.
- VENETSANOS, A. G., HULD, T., ADAMS, P. & BARTZIS, J. G. 2003. Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment. *Journal of Hazardous Materials*, 105, 1-25.
- WIJESUNDARA, L. M. G. & CLUBLEY, S. K. 2016. Numerical modelling of reinforced concrete columns subject to coupled uplift and shear forces induced by internal explosions. *Structure & Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance*, 12, 171-187.
- YANG, H., ZHUANG, G. V. & ROSS JR, P. N. 2006. Thermal Stability of LiPF₆ salt and Li-ion battery electrolytes containing LiPF₆. *Journal of Power Sources*, 161, 573-579.
- ZALOSH, R. CNG and hydrogen vehicle fuel tank failure incidents, testing, and preventive measures. 42nd annual loss prevention symposium (LPS), 2008 New Orleans, LA. Paper 4A.
- ZALOSH, R., AMY, J., HOFMEISTER, C. & WANG, W. 1994. Dispersion of CNG Fuel Releases in Naturally Ventilated Tunnels. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP-koncernens vision är att vara en internationellt ledande innovationspartner. Våra 1 400 medarbetare, varav över hälften akademiker och cirka 380 med forskarutbildning, utgör en betydande kunskapsresurs. Vi utför årligen uppdrag åt fler än 10 000 kunder för att öka deras konkurrenskraft och bidra till hållbar utveckling. Uppdragen omfattar såväl tvärtekniska forsknings- och innovationsprojekt som marknadsnära insatser inom provning och certifiering. Våra sex affärsområden (IKT, Risk och Säkerhet, Energi, Transport, Samhällsbyggnad och Life Science) svarar mot samhällets och näringslivets behov och knyter samman koncernens tekniska enheter och dotterbolag. SP-koncernen omsätter ca 1,5 miljarder kronor och ägs av svenska staten via RISE Research Institutes of Sweden AB.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

SP Arbetsrapport :

ISBN 978-91-88349-72-9

ISSN 0284-5172

PART OF **RISE**