



Analys av vätgassäkerhet i tunnlar och undermarksanläggningar

Thomas Berg

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Thomas Berg

Abstract

New sustainable alternative fuels have been implemented for the automotive sector and others are on the way to be introduced.

These new fuels can sometimes mean new type of risks that need to be taken care of in a safe way. The risks with fuels in the automotive sector shall not be exaggerated. Taken into the consideration how large this sector is there are comparably few accidents where the fuel had a large impact on the consequences of a traffic accident.

Contributing causes to this is the long tradition of automotive development and also extensive technical requirements on the design of cars, buses and trucks.

There are also extensive requirements regarding both quality and safety for fuels used in the automotive area.

When a new fuel is introduced it is very important to understand the unique risks and how this new fuel behaves in different situations. The vehicles, fuelling stations as well as the logistical system need to be designed in a way that safety is ensured.

When introducing a new fuel the legislation and the technical standards need to be updated early to support this development work.

All fuels for the automotive will in some aspect mean a risk for fire or explosion. Both liquid fuels, such as gasoline or ethanol, and fuels in the state of gas, can in a mixture with air start to burn or explode if it is ignited.

Hydrogen as a new fuel introduces some different risk scenarios. It is lighter than any other substances, it has a much broader interval from the lower explosion limit (LEL) to the upper explosion interval (UEL) and it only needs a very low ignition energy to explode or burn.

For a fuel cell vehicle the risks in tunnels and underground parking garages are generally not higher than for cars using other common fuels such as gasoline. One risk that is special for this type of car is that it is equipped with one or more pressurized tanks. The tanks are normally designed to carry a pressure of 700 bar. In the case of a fire there is a safety valve that releases the hydrogen from the high pressure tank in order to lower the load on the tank. During an ongoing fire this safety valve will open and release a jet flame which will give more energy for the fire during a short period of time. Investigations have shown that under extreme conditions it can be a risk that this safety system is not working satisfactory which can result in a tank explosion. This can only happen when the fire in the car has been going on for a while. The design of the tank systems have been further improved to minimize this risk.

The main problems regarding tunnel safety comes with the transportation of the hydrogen. To increase the effectiveness of the transportation there is a trend towards higher pressure of the hydrogen transported to be able to transport higher quantities. A release of large volume hydrogen in a tunnel gives a risk of severe damages to the tunnel in case of an explosion. It seems that the risks and the consequences of these large volumes have not been investigated.

The transportation of cooled down liquefied hydrogen (LH₂) gives a very complex risk scenario. First will all surrounding gases be liquefied in the event of a major leakage, then the hydrogen will act in the same way as a heavy gas and finally act as a very light gas. Liquefied hydrogen will be transported both by truck and by railway. These risks needs to be evaluated further.

In this report SP has proposed further investigations regarding tunnel safety mainly regarding transportation of hydrogen but also regarding development of instructions for rescue activities in the case of accidents or fire in tunnels. Further investigations

regarding updated requirements for underground parking garages might also be needed even if the risk level here is judged to be low.

Key words: Vätgasinfrastruktur för transporter, Fördjupningsstudie I, Energimyndigheten, Bränslecellsfordon, Vätgasbil, Fuel cell vehicle, Tunnel safety, Hydrogen safety,

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport : 2014:72
ISBN 978-91-88001-24-5
ISSN 0284-5172
Borås

Innehållsförteckning / Contents

Abstract	3
Innehållsförteckning / Contents	5
Förord / Preface	8
Sammanfattning / Summary	10
1 Bakgrund	12
2 Förkortningar	12
3 Avgränsning	13
4 Objektsbeskrivningar	13
4.1 Vägtunnlar	13
4.2 Järnvägstunnlar	13
4.3 Underjordiska järnvägsstationer	13
4.4 Parkeringshus	14
4.5 Enskilda garage	14
5 Aktörer	14
5.1 Sveriges Riksdag	14
5.2 Energimyndigheten	14
5.3 MSB, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap	14
5.4 Transportstyrelsen	14
5.5 Trafikverket	15
5.6 Trafikanalys	15
5.7 VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut	15
5.8 Länsstyrelserna	15
5.9 Boverket	15
5.10 Tidigare omorganisationer	16
6 Kravsättningar och regelverk	16
6.1 Vägtunnlar och järnvägstunnlar	16
6.1.1 Tunnelkategorier	16
6.2 Underjordiska järnvägsstationer	16
6.3 Parkeringshus	17
6.4 Transport av farligt gods	17
6.4.1 Transport av farligt gods på väg	17
6.4.1.1 Naturgas	17
6.4.1.2 Väte	18
6.4.2 Transport av farligt gods på järnväg	18
7 Intervjuer	19
8 Egenskaper för väte	19
8.1 Allmänt	19
8.2 Risker	19
8.2.1 Flampunkt	20
8.2.2 Explosionsgränser (LEL samt UEL)	20
8.2.3 Termisk tändtemperatur	20
8.2.4 Temperaturklass	20

8.2.5	Explosionsgrupp	20
9	Tekniska beskrivningar	21
9.1	Fordon som drivs av vätgas	21
9.1.1	Fordon med vätgasdriven förbränningsmotor	21
9.1.2	Bränslecellsfordon	21
9.2	Tankbil för transport av komprimerad vätgas	22
9.3	Tankbil för transport av flytande nedkyld väte	22
9.4	Järnvägsvagn för transport av komprimerad vätgas	23
9.5	Järnvägsvagn för transport av flytande nedkyld väte	23
10	Omvärldsanalys av studier inom området	24
10.1	Sammanfattning	24
10.2	Allmän analys av vätgasläckage från vätgasdrivna fordon	24
10.3	Spontan antändning av vätgas	25
10.4	Analys av beräkningsmodeller för utsläpp i slutna utrymmen	25
10.5	Brandprovning av vätgasfordon samt vätgastank	26
10.6	Brandprovning på trycktank med havererad säkerhetsventil (PRD)	26
10.7	Risker med lagring av flytande väte i fordon	27
10.8	Lärdomar från olyckor med fordon drivna av naturgas (CNG)	27
10.9	Analys av risker i tunnlar	27
10.10	Listning av några omfattande analyser	28
10.10.1	Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research.	28
10.10.2	Miljökonsekvensbeskrivning – LNG terminal, Göteborgs hamn	29
11	Summering av risker i vägtunnlar	29
11.1	Risker vid stillastående trafik	29
11.1.1	Vätgasdrivet fordon	29
11.1.2	Transport av komprimerad vätgas	29
11.1.3	Transport av flytande väte	29
11.2	Risker vid trafikolycka	30
11.2.1	Trafikolycka med vätgasdrivet fordon	30
11.2.2	Trafikolycka med lastbil lastad med komprimerad vätgas	31
11.2.3	Trafikolycka med lastbil lastad med nedkyld kondenserat väte	31
12	Summering av risker i järnvägstunnlar	32
12.1	Stillastående tåg i tunnel	32
12.2	Allvarigare urspårning	32
13	Summering av risker i enskilda garage	32
14	Summering av risker i underjordiska parkeringshus	33
15	Rekommendationer till fortsatta utredningar och aktiviteter	33
15.1	Transporter av väte både i form av komprimerad gas och i form av nedkyld flytande väte	33
15.2	Effekterna av brand i parkeringshus samt enskilda garage	34
15.3	Strategier och taktik vid trafikolyckor samt vid pågående bränder	34
16	Litteraturförteckning	34

Förord / Preface

Transportsektorn genomgår för närvarande förändringar i samband med den successiva övergången till ett mer fossiloberoende samhälle. Flera nya drivmedel för fordon har införts och ytterligare är på väg in.

Dessa nya drivmedel kan ibland innebära nya typer av risker som behöver kunna hanteras i samhället. 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 påverkan 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. Vi har också ett väl utvecklat regelverk kring hantering av de olika bränslen som används idag.

Vad som är viktigt när ett nytt fordonsbränsle skall föras in är att förstå hur det aktuella bränslet uppför sig i olika situationer och utifrån detta konstruera fordon, tankstationer mm samt även skapa säkra hanteringsrutiner. Lagkrav och standarder behöver utarbetas på ett tidigt stadium för att både styra och stödja detta utvecklingsarbete.

Generellt sett kan sägas att fordonsbränslen i de flesta fall innebär någon form av brand- eller explosionsrisk. Flytande bränslen, som bensin eller etanol, samt brännbara gaser kan antändas och börja brinna vid ett eventuellt läckage. Även explosiva blandningar med luft kan bildas. En blandning betraktas som explosiv om det brännbara ämnet är homogent blandat med luft så att det har en volymprocent mellan nedre och övre explosionsgränserna (LEL och UEL i tabellen nedan). Om en sådan blandning kommer i kontakt med en tändkälla med tillräckligt energiinnehåll som t.ex. en öppen låga eller en gnista sker en explosion. Även en mycket het yta kan orsaka en explosion.

Ett av dessa drivmedel som nu har börjat användas är vätgas. Vätgasen används som energibärare för bränslecellsfordon. Hantering av vätgas är inget nytt, det har använts inom petrokemin under lång tid samt även inom kemisk industri, t.ex. biprodukt vid klorframställning. Däremot är användningen som fordonsbränsle nytt.

Det har framförts en oro att det kan finnas vissa otydligheter i regelverken för säkerhet. Det gäller tänkbara riskscenarier vid hanteringen av flytande väte samt vätgasapplikationer i undermarks-anläggningar (garage mm) och tunnlar. Regelverk för fordon och byggnationer är i dag inte koordinerade. För fordon gäller regler på överstatlig nivå medan tunnlar och byggnader hanteras på nationell eller lokal nivå. Avsaknaden av koordinering av regelverk leder i dagsläget till att det finns en betydande osäkerhet bland intressenter (användare, myndigheter, kommuner, transportansvariga, stadsplanerare etc.) om den befintliga metodiken för säkerhet är heltäckande för en trafikmiljö med vätgasdrivna fordon och därtill hörande transporter av vätgas.

Transportstyrelsen har utökat mandat från 1-juli 2013 kring föreskrifter om strukturer för både väg och järnväg. Tidigare boverkets och trafikverkets.

Denna utredning har finansierats via bidrag från Energimyndigheten och ingår som arbetspaket nr 4.3 i projektet Vätgasinfrastruktur för transporter – Fördjupningsstudier I 2014. Studien projektleds av Sweco och övriga aktörer är KTH, VTI och Vätgas Sverige.

Denna rapport har tagits fram för att kartlägga dels riskscenarierna, dels regelverken och hur man bör hantera potentiella brister. Rapporten kan laddas ner från SPs hemsida, www.sp.se.

Sammanfattning / Summary

Vätgas har nu börjat användas som fordonsbränsle internationellt. Den applikation som nästan genomgående är aktuell är bränslecellsfordon. Denna fordonstyp är egentligen ett elfordon som är försett med en vätgasdriven bränslecell för att försörja den elektriska drivmotorn. Batteriet fungerar huvudsakligen som energibuffert och är väsentligt mycket mindre än hos ett konventionellt elfordon. Ett bränslecellsfordon behöver normalt ej laddas upp separat.

Sverige ligger ganska sent med införandet av bränslecellsfordon. Det finns ännu så länge en provflotta på 3 fordon som körs i regi av Region Skåne och Malmö Stad. Dessutom har Sandvik på kort tid satt upp en tankstation i Sandviken och visar upp en demo med bilar och en truck. I vissa perioder har också en mobil tankstation satts upp i vintertestregionen för test av internationella bilar.

Detta kan jämföras med t. ex. Norge där det finns ett stort antal i drift och där det finns en utbyggd infrastruktur av tankstationer i och kring Osloområdet. Utbyggnad pågår också i flera länder i Europa (exempelvis England och Danmark) med Tyskland som föregångsland. Utanför Europa sker utbyggnaden framför allt i Korea, Japan och Kalifornien.

På EU nivå har det tagits beslut om en rekommendation om att ta fram en plan för införande av infrastruktur med vätgasstationer.

Vad det gäller risker med vätgas som fordonsbränsle har det genomförts många studier och analyser. I vissa fall har man jämfört med andra typer av gasdrivna fordon som har varit i bruk betydligt längre tid och därmed skapat ett säkrare underlag vad det gäller risker. Man har också återfört erfarenheter från inträffade olyckor.

Riskerna med vätgas som fordonsbränsle kan till stor del sägas vara jämförbara med andra gasformiga bränslen. Det finns dock tre väsentliga olikheter för vätgasen jämfört med övriga gasformiga bränslen: vätgas är den lättaste gas som finns vilket gör att den alltid mycket kraftigt strävar uppåt, vätgas har ett extremt brett blandningsintervall vad det gäller brännbarhet och explosionsgränser och vätgas behöver väldigt lite energi för att antända en explosiv vätgas/luft-blandning.

För en vanlig bränslecellsbil är riskerna vad det gäller brand och explosion i tunnlar och garage inte högre än för en konventionell bil som drivs med bensin. Snarare är riskerna lägre eftersom den medförda mängden bränsle är mindre.

Det finns dock risker kopplade till högtryckstankar som både bränslecellsbilar och de flesta gasdrivna fordon har. Detta gäller när högtryckstankar blir utsatta för en hög temperatur i samband med brand. Efter det att branden har pågått en viss tid kommer bilens säkerhetssystem att släppa ut vätgasen ur högtryckstankarna för att avlasta dessa (bränslecellsfordon är försedda med bränsletankar med komprimerad vätgas upp till ett tryck på maximalt 700 bar). En flamma kommer då under en kortare tid att öka på brandintensiteten. Flammans riktning styrs av konstruktionen hos den aktuella bilen. Utredningar har påvisat att under extremt ogynnsamma förhållanden finns det risk att, om detta säkerhetssystem inte fungerar som det är tänkt, en av dessa tankar exploderar efter en viss tids brand. Det pågår ett fortsatt utvecklingsarbete för att ytterligare minimera denna risk.

När det gäller transport av komprimerad vätgas på lastbil så är riskbilden annorlunda jämfört med en bränslecellsbil. Det är större mängd som transporteras per fordon och man strävar efter att transportera med ett allt högre tryck i behållarna för att skapa en bättre transporteffektivitet. Konsekvenserna vid ett eventuellt läckage i en tunnel kan bli mycket allvarliga. Tunnlar är dimensionerade vad det gäller brand men effekterna av en explosion verkar inte ingå i bedömningar. Om man skall tillåta transport i tunnel är det väsentligt att

kontrollera dimensioneringen med avseende på explosion. Det ser ut som om detta även är ett internationellt problem. Det har inte gått att verifiera om det har utretts eller testats effekterna av större vätgasexplosioner i tunnlar.

Det verkar vara viktigt att utreda detta samt också se över kriterier vid godkännande av farligt godshantering genom specifika tunnlar (ADR).

Transport av nedkyld kondenserat väte uppvisar en betydligt mer komplicerad riskbild än transport av komprimerad vätgas. Ett läckage skulle spridas inom ett mycket bredare område eftersom vätet först är i vätskefas och kommer att kyla ner allt i sin omgivning, sedan uppföra sig som en tung gas och därefter som en mycket lätt gas. På kortare sikt kommer sannolikt inte nedkyld kondenserat väte att transporteras per järnväg. På längre sikt bör riskscenariot vad det gäller järnvägstransport genom tunnlar utredas.

När det gäller parkeringshus och garage så bör man göra en genomgång av befintliga regelverk med avseende på vätgasens annorlunda egenskaper jämfört med redan etablerade fordonsgaser och bedöma behovet av eventuella kompletteringar.

Räddningstjänsten bör se över sina instruktioner så att man har beredskap för och har tränat sig i hantering av olyckor i både väg- och järnvägstunnlar och hantering av bränder i parkeringshus. Nedkyld kondenserat väte ger mycket besvärliga säkerhetsfrågor för räddningstjänsten.

Generellt sett är gasfordon inget nytt för Sverige. Fordon som drivs med CNG och biogas har funnits länge och det har varit mycket få olyckor med dessa fordon.

Bränslecellsfordonen kommer inte att skilja sig så mycket från dessa.

Den större problematiken kring riskerna med vätgas som fordonsbränsle kommer att handla om transporterna, både vad det gäller vägtunnlar och järnvägstunnlar.

1 Bakgrund

Vid några fordonsrelaterade projekt har det framkommit att det finns otydligheter i regelverken som berör säkerheten. Som exempel kan nämnas HIT-projektet (Hydrogen Infrastructure for Transportation), det pågående HyTrEc-projektet samt det avslutade H2-moves Scandinavia-projektet. Otydligheterna gäller framförallt tänkbara riskscenarier vid hanteringen av flytande väte samt vätgasapplikationer i undermarksanläggningar (garage mm) och tunnlar.

Strukturen för regelverken som berör säkerheten är komplex. Exempelvis är regelverk för fordon och regelverk för byggnationer idag inte koordinerade. För fordon gäller regler på överstatlig nivå medan tunnlar och byggnader hanteras på nationell eller lokal nivå.

Avsaknaden av koordinering av regelverk leder i dagsläget till att det finns en betydande osäkerhet bland intressenter (användare, myndigheter, kommuner, transportansvariga, stadsplanerare etc.) om det befintliga säkerhetstänket är heltäckande för en trafikmiljö med vätgasdrivna fordon och därtill hörande transporter av vätgas.

2 Förkortningar

<u>Förkortning</u>	<u>Förklaring</u>	<u>Land/ursprung</u>
CFD	Computational fluid dynamics (sv: beräkningsströmningsdynamik)	
CNG	Compressed Natural Gas (sv: komprimerad naturgas)	
DOE	Department Of Energy	USA
DOT	Deptment Of Transportation	USA
E85	Bensin-Etanolblandning (min 15 vol% bensin) (vintertid upp till 25 vol% bensin)	Sverige
HIT	Hydrogen Infrastructure for Transportation	Sverige
HyTrEc	Hydrogen Transport Economy	EU
LEL	Lower Explosion limit (nedre explosionsgräns)	
LH2	Liquid Hydrogen (flytande väte)	
LNG	Liquid Natural Gas (flytande naturgas)	
NGVs	Compressed Natural Gas Vehicle (sv: fordon som drivs med komprimerad naturgas).	
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration	USA
PEM	Proton Exchange Membrane	
SIS	Swedish Standards Institute	Sverige
SP	Sveriges Tekniska Forskningsinstitut	Sverige
TK	Teknisk kommitté	
UEL	Upper Explosion Limit (övre explosionsgräns)	

3 Avgränsning

Denna utredning är avsedd att gälla svenska förhållanden eftersom det skulle bli alldeles för omfattande att gå in på situationen i övriga länder. Dock är mycket av referensmaterialet hämtat från andra länder vilket bidrar till att några av slutsatserna sannolikt kan vara tillämpbara för andra länder.

Utredningen avgränsas till vätgasdrivna fordon samt transporter av vätgas med lastbil eller tåg i tunnlar och slutna utrymmen (garage, parkeringskällare mm). Syftet är att identifiera och analysera relevanta problemställningar för att fastställa de faktiska riskerna med vätgasdrivna fordon och transporter av vätgas i tunnlar och andra slutna utrymmen i jämförelse med konventionellt drivna fordon och transport av tillhörande drivmedel.

Projektet genomförs med utgångspunkt från dagens design av relevanta vätgasdrivna fordon. Vidare kommer transporter av vätgas att inkluderas i studien, tillsammans med fasta byggnationer i form av tunnlar och andra slutna utrymmen där fordonen vistas. Här är det extra relevant att beakta tunnlar och andra slutna utrymmens utformning och ventilation, samt funktionen av övertrycksventiler i fordon för att bedöma explosionsrisker och möjligheten att begränsa dessa.

4 Objektsbeskrivningar

För att lättare hålla isär de olika riskscenarierna är det lämpligt att gruppera de aktuella objekten där säkerhetsfrågorna analyseras. Vissa av objekten i nedanstående beskrivning faller inte helt och hållet in under begreppet undermarksanläggning men bör till vissa delar innefattas av slutsatserna.

4.1 Vägtunnlar

Här innefattas tunnlar som är avsedda att användas för allmän trafik med vägfordon. Längden på dessa tunnlar varierar mellan några fåtal meter till de idag längsta på cirka 4 km. Det statliga vägnätet omfattar cirka 30 tunnlar. Till detta kommer andra tunnelförvaltare som Stockholms stad och Göteborgs stad. De flesta av tunnelarna har delade körfält (ett tunnelrör för vardera körriktningen).

4.2 Järnvägstunnlar

Här innefattas tunnlar för järnvägstrafik. Tunnlar för enbart spårvägstrafik är ej inkluderade. Det finns cirka 170 järnvägstunnlar i Sverige. Den kortaste har en längd på ca 20 meter och den längsta har en längd på 6001 meter. Ett antal kommunalt ägda tunnlar finns också.

4.3 Underjordiska järnvägsstationer

Det finns cirka 6-10 stycken underjordiska järnvägsstationer. Någon eller några av dessa är dock ej berörda av passerande godstrafik (Helsingborg, Malmö, Arlanda).

4.4 Parkeringshus

Parkeringshus finns i stor mängd över landet koncentrerade till storstadsområdena. En lämplig uppdelning av parkeringshus med avseende på riskskenarier kan vara att dela upp dem enligt följande:

- Fristående parkeringshus ovan jord
- Fristående parkeringshus under jord
- Parkeringshus ovan jord med bostäder/kontor/affärer i direkt anslutning
- Parkeringshus under jord med bostäder/kontor/affärer direkt ovanför

4.5 Enskilda garage

Här innefattas typiska villagarage, fristående eller som integrerad del i bostaden, parkeringshuslängor inom radhusområden samt bilverkstäder .

5 Aktörer

5.1 Sveriges Riksdag

Sveriges Riksdag utfärdar förordningar vilka beskriver ansvarsfördelningen mellan olika myndigheter och övriga aktörer.

5.2 Energimyndigheten

Energimyndigheten verkar inom olika samhällssektorer för att skapa villkoren för en effektiv och hållbar energianvändning och en kostnadseffektiv svensk energiförsörjning. Energimyndigheten lämnar utvecklingsstöd kopplat till förnybara energikällor, smarta elnät samt framtidens fordon och bränslen. Man stödjer också innovationer och nya affärsidéer inom svenskt näringsliv.

Energimyndigheten deltar i internationella samarbeten för att nå klimatmålen, och hanterar olika styrmedel som elcertifikatsystemet och handeln med utsläppsrätter. Man tar dessutom fram nationella analyser och prognoser, samt Sveriges officiella statistik på energiområdet.

5.3 MSB, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB, är en statlig myndighet med uppgift är att utveckla samhällets förmåga att förebygga och hantera olyckor och kriser. Arbetet sker tillsammans med många andra – kommuner, landsting, myndigheter och organisationer. När en allvarlig olycka eller kris inträffar ger MSB stöd till de som är ansvariga. MSB ska också se till att samhället lär sig av det som inträffat. MSB ansvarar också för samordning av utbildningar för räddningstjänst mm.

5.4 Transportstyrelsen

Transportstyrelsen är en myndighet under näringsdepartementet.

Transportstyrelsen arbetar med järnvägs-, luftfarts-, sjöfarts- samt vägtrafiksfrågor.

Inom alla dessa trafikslag arbetar man med:

- Utforma regler
- Pröva och ge tillstånd, det vill säga att reglerna följs

- Utöva tillsyn
- Föra statistik över olyckor
- Föra register

Järnväg

Inom detta område arbetar man bland annat med tillsyn vid transport av farligt gods. Detta innefattar exempelvis att skyltningar är riktiga samt att fordonen är säkra.

Fordon för spårtrafik skall godkännas av Transportstyrelsen innan det får tas i bruk i Sverige. På samma sätt skall infrastrukturen godkännas, i denna ingår bl. a. spåranläggningar och signalsystem.

Transportstyrelsen ställer också krav på järnvägsfordon för transport av farligt gods.

Vägtrafik

Transportstyrelsen ansvarar bl. a. för trafikregler och vägmärken.

De tekniska fordonskraven fastställs vanligtvis genom internationella beslut där transportstyrelsen deltar. Kraven tydliggörs sedan i Transportstyrelsens föreskrifter.

Transportstyrelsen ger ut allmänna råd om val av tunnelkategori enligt trafikförordningen.

5.5 Trafikverket

Trafikverket ansvarar för långsiktig planering av transportsystemet för alla trafikslag (vägtrafik, järnvägstrafik, sjöfart och luftfart) samt för byggande, drift och underhåll av statliga vägar och järnvägar så att transportsystemen är energieffektiva och säkra.

Trafikverket ansvarar även för genomförande av prov för körkort, taxiförarlegitimation, yrkeskunnande för trafiktillstånd och yrkesförarkompetens. Trafikverket verkar även för en grundläggande tillgänglighet i den interregionala kollektiva persontrafiken genom bland annat upphandling av trafik.

5.6 Trafikanalys

Trafikanalys granskar beslutsunderlag, utvärderar åtgärder och ansvarar för statistik.

Trafikanalys arbetar mycket på uppdrag.

5.7 VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut

VTI är ett oberoende forskningsinstitut inom transportsektorn. VTI utför tillämpad forsknings- och utvecklingsverksamhet som rör samtliga trafikslag. Viktiga områden är säkerhet, ekonomi, miljö, trafik- och transportanalys, kollektivtrafik, beteende och samspel människa–fordon–transportsystem, vägkonstruktion samt drift och underhåll.

5.8 Länsstyrelserna

Det är Länsstyrelsen som via lokala trafikföreskrifter beslutar om tunnelkategori B, C, D eller E skall tillämpas för varje specifik vägtunnel.

Länsstyrelserna har bemyndigande att utfärda lokala trafikföreskrifter för att förbjuda vissa vägar för transport av farligt gods. De kan även rekommendera lämpliga transportvägar samt ange vilka parkeringsplatser som bör användas vid exempelvis vila.

5.9 Boverket

Boverket arbetar i första hand med frågor som rör samhällsplanering, byggande och boende. Grunden för detta arbete är plan- och bygglagen, delar av miljöbalken samt

bostadsförsörjningslagen. Säkerheten vad det gäller parkeringshus samt garage hanteras av Boverket.

5.10 Tidigare omorganisationer

Den 1 januari 2009 lades Räddningsverket, Krisberedskapsmyndigheten och Styrelsen för psykologiskt försvar ner och ersattes av nya Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB.

Banverket och vägverket blev Trafikverket 2010.

Transportstyrelsen bildades i januari 2009 av f.d. Järnvägsstyrelsen, delar av Vägverket, Luftfartstyrelsen, Sjöfartsinspektionen, trafikregistret (från Vägverket), körkortsregistret (från Länsstyrelsen) och behörigheter/tillsyn av yrkesmässig trafik (från Länsstyrelsen).

6 Kravsättningar och regelverk

6.1 Vägtunnlar och järnvägstunnlar

TRVK Tunnel (TRV 2011:087) är ett trafikverksdokument som innehåller Trafikverkets tekniska krav vid dimensionering och utformning av tunnlar. TRVK Tunnel är en del av Trafikverkets Anläggningsstyrning.

TRVK Tunnel ska användas vid projektering av tunnlar från och med den 1 februari 2012. Dokumentet ska användas tillsammans med TRVR Tunnel (TRV 2011:088) samt TK Geo (TRV 2011:047). Dokumentet ersätter ATB Tunnel 2004 och BV Tunnel som upphör att gälla.

TSD (Teknisk Specifikation för Driftskompatibilitet) Säkerhet i järnvägstunnlar

Krav på material utförande och kontroll återfinns i AMA Anläggning 10. Trafikverkets ändringar och tillägg till dessa krav återfinns i senaste utgåvan av TRVAMA Anläggning 10.

6.1.1 Tunnelkategorier

På Transportstyrelsens hemsida beskrivs systemet med tunnelkategorier:

”Den 1 januari 2012 infördes bestämmelser om indelning av vägtunnlar i

tunnelkategorierna A, B, C, D och E. Indelningen i tunnelkategorierna grundas på tunnelarnas känslighet för olyckor vid transport av farligt gods genom tunneln.

I allmänhet tillhör en vägtunnel kategori A och märks då inte ut med ett vägmärke.

Tillhör en vägtunnel kategori A gäller inga tunnelrestriktioner. För vägtunnlar som tillhör tunnelkategori B-E gäller olika tunnelrestriktioner för transport av farligt gods.

Tunnelkategorin B är den tunnelkategori som har det minst stränga förbudet mot fordon som transporterar farligt gods, medan tunnelkategori E är den tunnelkategori är den kategori som har det strängaste förbudet. Det är Länsstyrelsen som beslutar lokala trafikföreskrifter om att en vägtunnel ska tillhöra tunnelkategori B, C, D eller E.”

6.2 Underjordiska järnvägsstationer

Det finns inga unika krav vad det gäller personsäkerhet för underjordiska järnvägsstationer. För dessa gäller samma krav som för vanliga stationer. Dock har trafikverket en pågående utredning om detta.

6.3 Parkeringshus

Boverket ansvarar för kravsättningen övergripande. Lokalt utfärdade krav finns också. Boverket utfärdar ett stort antal byggregler (BBR). Ett antal av dessa handlar om säkerhet samt brandrisker.

6.4 Transport av farligt gods

Lag (2006:263) om transport av farligt gods är den övergripande bestämmelsen för denna verksamhet. Den täcker både transport på väg och järnväg samt även de flesta övriga transportslag. (1)

Förordning om ändring i förordningen (2006:311) om transport av farligt gods (SFS 2013:544) beskriver vilka olika myndigheter som skall utöva tillsyn över att lagen (2006:263) följs. Transportstyrelsen ansvarar för järnvägstransporter. Polismyndigheterna ansvarar för vägtransporter. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap skall samordna tillsynsmyndigheternas verksamheter samt bistå med sakkunskap. (2)

MSB utfärdar regelverken för transport av farligt gods.

Regelverket för transport av farligt gods på väg är benämnt ADR-S och för järnväg RID-S.

- ADR-S, Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om transport av farligt gods på väg och i terräng, MSBFS 2012:6, ISBN 978-91-7383-281-6
- RID-S, Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om transport av farligt gods på järnväg, MSBFS 2012:7, ISBN 978-91-7383-282-3

Föreskrifterna ADR-S och RID-S är i allt väsentligt baserade på bestämmelserna i de internationella överenskommelserna ADR och RID. ADR och RID ska tillämpas vid internationell transport mellan länder som är anslutna till respektive överenskommelse.

Utdrag ur konsekvensutredning avseende förslag till föreskrifter om ändring i Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter (MSBFS 2012:7) om transport av farligt gods på järnväg (RID-S) följer nedan:

Sverige är enligt Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/68/EG skyldigt att tillämpa dessa bestämmelser även vid inrikes transport. Reglerna är beslutade internationellt och enligt direktivet nämnt ovan. Sverige får inte införa nationella avvikelser såvida dessa inte har godkänts av EU. Förutom de godkända nationella avvikelser som anges i bilaga S samt de möjligheter till lättnader som finns i de multilaterala avtal som Sverige har undertecknat, kan inga alternativa bestämmelser införas.

6.4.1 Transport av farligt gods på väg

Länsstyrelsen ansvarar för klassificering av vilka typer av farligt gods som får transporteras i varje enskild vägtunnel. Klassificeringen skiljer sig till vissa delar mellan de olika brandfarliga gaserna samt även mellan komprimerad och kondenserad gas. Nedan redovisas klassificeringar för naturgas samt för vätgas.

6.4.1.1 Naturgas

Komprimerad naturgas (CNG)

UN-nummer: 1971

Transportkategori: 2

Tunnelkod: B/D
 Farlighetsnummer: 23

Naturgas, nedkyld, flytande (LNG)

UN-nummer: 1972
 Transportkategori: 2
 Tunnelkod: B/D
 Farlighetsnummer: 223

Tunnelrestriktionskod (B/D) innebär följande:

- Tanktransport: Endast tillåtet genom A-tunnlar (dvs förbjudet för transport genom B-, C-, D- och E-tunnlar).
- Stycke gods: Tillåtet genom A-, B- och C-tunnlar (dvs förbjudet genom D- och E-tunnlar).

6.4.1.2 Väte

Komprimerad väte

UN-nummer: 1049
 Transportkategori: 2
 Tunnelkod: B/D
 Farlighetsnummer: 23

Väte, nedkyld, flytande (LH2)

UN-nummer: 1966
 Transportkategori: 2
 Tunnelkod: B/D
 Farlighetsnummer: 223

Vid transport av vätgas, med hjälp av exempelvis lastbil eller tåg, tillämpas samma regelverk som för övriga transporter av farligt gods.

Tunnelrestriktionskod (B/D) innebär följande:

- Tanktransport: Endast tillåtet genom A-tunnlar (dvs förbjudet för transport genom B-, C-, D- och E-tunnlar).
- Stycke gods: Tillåtet genom A-, B- och C-tunnlar (dvs förbjudet genom D- och E-tunnlar).

6.4.2 Transport av farligt gods på järnväg

Länsstyrelsen beslutar om vilka typer av farligt gods som får transporteras i vilka järnvägstunnlar.

Komprimerad väte

UN-nummer: 1049
 Klassificeringskod: 1F

Väte, kyld, flytande (LH2)

UN-nummer: 1966
 Klassificeringskod: 3F

8.2.1 Flampunkt

Flampunkt är den lägsta temperatur när vätskan kan börja skapa en explosiv blandning tillsammans med luft. Över denna temperatur börjar brännbara gaser bildas, ju högre temperatur desto snabbare gasbildning.

8.2.2 Explosionsgränser (LEL samt UEL)

När en brännbar gas blandas med luft skapas en gasblandning. Inblandningsmängden av den brännbara gasen brukar i dessa sammanhang uttryckas i volymprocent i förhållande till luftmängden (% volym).

Enligt det internationella klassningssystemet (IEC 60079-20-1) har man fastställt gränsvärden mellan vilka det är möjligt att en gasblandning kan fås att explodera. Det är en omfattande provning som ligger till grund för dessa gränser. Gränserna gäller vid normala atmosfäriska förhållanden och påverkas av avvikelser vad det gäller tryck och temperatur.

Det finns en nedre gräns för explosionsområdet. Den har benämningen LEL (lower explosion limit). Den definierar den minimala inblandningsmängden av det brännbara ämnet. På samma vis finns det en övre gräns som har benämningen UEL (upper explosion limit).

Vätgas kan fås att explodera inom intervallet 4-77 volym% inblandning i luft.

Det cirkulerar viseledande information om betydligt snävare intervall för dessa gränsvärden men det saknas vetenskaplig grund för det.

Notera att när man närmar sig gränsvärdena för explosionsgränserna så är det dels mycket svårt att åstadkomma explosion och explosionen blir också betydligt svagare än om den inträffar vid en optimal blandning.

Explosionsgränserna kan också uttryckas i form av milligram väte/liter luft. Detta är lämpligt att använda vid bedömning av risker vid hantering i vätskeform.

LEL: 3,4 mg/l

UEL: 63 mg/l

8.2.3 Termisk tändtemperatur

Termisk tändtemperatur är i princip hur varm en yta på ett föremål behöver vara för att antända gasblandningen. Den termiska temperaturen är förhållandevis hög för vätgas. Det är bara metangas som har en högre termisk temperatur.

8.2.4 Temperaturklass

Temperaturklass används för att fastställa de maximala yttemperaturerna för utrustningar som är i kontakt med aktuell gas. $T_2=300\text{ °C}$ och $T_1=450\text{ °C}$

8.2.5 Explosionsgrupp

Explosionsgrupp beskriver i princip hur lättantändlig gasblandningen är. Det finns IIA, IIB och IIC där IIC är den gruppen som innefattar de mest antändliga gaserna (för mer information se SS-EN 60079-20-1).

Ur tabellen kan man dra några slutsatser om vätgasens egenskaper:

- Mycket lättantändlig men dock hög termisk tändtemperatur
- Extremt brett explosionsintervall (LEL=4 och UEL=77)
- Mycket lätt gas vilket gör att den stiger uppåt mycket snabbt (relativ densitet=0,07)

Om man exempelvis jämför vätgas med fordonsgas så kan man konstatera att vätgasen har en mycket stor fördel i och med att den är så lätt. Om det blir ett stort gasläckage så finns det risk att fordonsgasen tillsammans med luften i omgivningen bildar ett explosivt gasmoln runt läckageområdet. Detta är i det närmaste omöjligt för vätgas eftersom vätgasen är så oerhört lätt. Dock blir situationen annorlunda om vätgasen läcker ut i ett slutet utrymme eller ett utrymme som är täckt av ett tak.

Om man jämför antändbarheten för en vätgas-luft blandning i förhållande till en fordonsgas-luft blandning så är det betydligt lättare att antända vätgasblandningen. Det är två faktorer som påverkar detta. Dels att vätgasen inte kräver lika mycket energi för att antändas och dels att det är så oerhört brett explosionsintervall.

9 Tekniska beskrivningar

9.1 Fordon som drivs av vätgas

Det finns två olika grundprinciper för att driva ett fordon på vätgas. Det är antingen att använda en förbränningsmotor eller att använda en bränslecell.

9.1.1 Fordon med vätgasdriven förbränningsmotor

Denna fordonstyp drivs med en traditionell förbränningsmotor som är anpassad för att drivas av vätgas. Vätet för dessa fordon förvaras i gasform i trycktankar med ett tryck på upp till 700 bar. Väte kan också förvaras i flytande nedkyld form för att skapa en bättre energitäthet. BMW presenterade 2006 ett koncept med denna lösning (3).

9.1.2 Bränslecellsfordon

Denna fordonstyp är egentligen ett elfordon som är försett med en vätgasdriven bränslecell för att försörja den elektriska drivmotorn. Batteriet fungerar huvudsakligen som energibuffert och är väsentligt mycket mindre än hos ett konventionellt elfordon. Ett bränslecellsfordon behöver normalt ej laddas upp separat.

Vätet förvaras även här i gasform i trycktankar med ett tryck på upp till 700 bar men kan i princip också förvaras i flytande nedkyld form. Om det förvaras i flytande form måste det förångas innan det förs in i bränslecellen. Kommersiella tekniska lösningar finns för närvarande ej för denna teknik i ett fordon.

Elektriska delen

Det elektriska systemet är uppbyggt på samma sätt som i ett vanligt elfordon med liknande spänningsnivåer för kraftelektronik och elmaskiner. Batterikapaciteten är dock väsentligt mycket lägre än för ett konventionellt elfordon. Detta eftersom bränslecellen kontinuerligt tillför elektrisk energi till drivsystemet och batteriet.

Bränslecellen

Bränsleceller som används för fordonsapplikationer är normalt av en så kallad PEM-typ (Proton Exchange Membrane).

Bränsletankar

Bränsletankarna för moderna bränslecells-bilar är normalt gjorda i avancerade kolfiber-material och tillverkade för ett arbetstryck på 700 bar. Koncentrationen av vätgas i tanken är alltid 100 % vilket gör att explosiv blandning aldrig kan förekomma inuti tanken. Teoretiskt sett kan man åstadkomma en explosiv blandning av vätgas i tanken om mängden vätgas är tillräckligt liten. Om denna blandning skulle explodera skulle man i värsta fall uppnå ett explosionstryck på 11-15 bar vilket är väsentligt lägre än vad tanken

är byggd för. Dessa värden är erfarenhetsmässiga, bland annat baserade på de olika explosionsprovningar som har genomförts på SP på andra typer av bränsletankar.

9.2 Tankbil för transport av komprimerad vätgas

Tekniskt sett har det varit svårt att transportera vätgas i större mängd under högt tryck. Dock har man nu ökat flasktrycket väsentligt. Air Products har presenterat (januari 2014) sitt nästa steg i utvecklingen med ett transportsystem som de kallar för SmartFuel® technology. Air Products börjar serieproducera dessa tanktrailers som är utrustade med komposittankar med ett tryck som man hävdar är ”väl över 350 bar”. Grundtanken är att ha tillräckligt högt tryck så att det går att leverera direkt till tankstationens högtryckssystem samt att öka transporteffektiviteten genom att få med mer vätgas vid varje transport.



Tankbil med högtrycksbehållare (4)

National Renewable Energy Laboratory har genomfört ekonomiska analyser vad det gäller vätgashantering. Vid lastbilstransporter strävar man att transportera med så högt tryck som möjligt. Detta görs med ett antal trycktuber som är skyddade av ett ramverk. Bedömningarna i denna rapport är att transporterad mängd kommer att vara 63-460 kg per lastbilssekipage med ett tryck på 200-600 bar. (5)

Department of Energy i USA har satt prognosen för 2015 till en kapacitet per lastbilssekipage på 700-1100 kg. (6)

9.3 Tankbil för transport av flytande nedkyld väte

Nedkyld flytande väte transporteras i speciella isolerade tankar som håller ett mycket lågt övertryck på 2-5 bar.

Tankbilar för transport av flytande väte är konstruerade på liknande vis som tankbilar för LNG. Väte kan dock ge upphov till väteförspredning så tankkonstruktionen samt all utrustning som hanterar väte måste tillverkas i rätt material för att undvika allvarliga haverier.



Tankbil för LNG (Liquid Natural Gas) (7)



Tankbil för LH2 (Liquid Hydrogen) (8)

Flytande väte (LH2) transporteras i speciella tankar med dubbla väggar som är isolerade från varandra för att minimera mängden väte som kokas av. Vissa tankar innehåller flytande kvävgas i den isolerade väggen för att ytterligare kyla ner innerväggen och minska avkokningsmängden.

Transporterad mängd flytande väte per lastbilssekipage är 360-4300 kg. (5)

När väte förvaras i nedkyld flytande form uppstår alltid en avdunstning av gas såvida man inte ständigt tillför kyla. Bedömd avdunstningsmängd (boil off rate) för lastbil samt järnvägsvagn är 0,3% till 0,6% per dag av lastad mängd. (5) Detta släpps normalt ut i atmosfären via ett ventilationsrör.

9.4 Järnvägsvagn för transport av komprimerad vätgas

Speciella tankvagnar för transport av komprimerad vätgas kommer sannolikt ej att användas i närtid. Det kommer inte att finnas behov av att transportera så stora mängder samtidigt. Scenariot vad det gäller transport av komprimerad vätgas är att det kommer att transporteras enstaka lastkorgar med flera trycktuber skyddade av lastkorgens ramverk. Troligtvis kommer samma lastkorg som för lastbil att användas för att underlätta omlastning och vidare lokal transport.

9.5 Järnvägsvagn för transport av flytande nedkyld väte

Ett tänkbart scenario för järnvägstransport är att transportera väte i flytande nedkyld form. Detta kan jämföras med LNG som i dagsläget transporteras på järnväg i Europa och är på väg att transporteras på järnväg i Sverige också. Enligt uppgifter i Miljökonsekvens-

utredningen för Göteborgsanläggningen (LNG) utfärdad december 2013 är regelverken kring järnvägstransport av LNG inte ännu fastställt. (7)

Tankvagnar för transport av flytande väte (LH2) kommer att vara konstruerade på liknande vis som tankvagnar för LNG. Väte kan dock ge upphov till väteförspredning så tankkonstruktionen samt all utrustning som hanterar vätet måste tillverkas i rätt material för att undvika allvarliga haverier.

Transporterad mängd flytande väte per järnvägsvagn är bedömt att ligga inom intervallet 2300-9100 kg. (5)

När väte förvaras i nedkyld flytande form uppstår alltid en avdunstning av gas såvida man inte ständigt tillför kyla. Bedömd avdunstningsmängd (boil off rate) för lastbil samt järnvägsvagn är 0,3% till 0,6% per dag av lastad mängd. (4) Detta släpps normalt ut i atmosfären via ett ventilationsrör.



Tankvagnar för LNG (Liquid Natural Gas) (7)

10 Omvärldsanalys av studier inom området

10.1 Sammanfattning

Omvärldsanalysen påbörjades under februari 2014. Ganska snabbt kunde konstateras att det finns en mycket stor mängd dokumentation tillgänglig från en lång rad av olika studier inom området. Dokumentationen är varierande, allt ifrån notiser i tidskrifter till forskningsrapporter. Många av rapporterna är baserade på omfattande forskning och mycket innehållsrika medan andra är kortfattade. Det finns även en del dokumentation som är tekniskt felaktig eller i övrigt vilseledande vilket fick beaktas under omvärldsanalysen.

10.2 Allmän analys av vätgasläckage från vätgasdrivna fordon

En hel del analysarbete har genomförts för att se över riskerna med vätgasläckage från vätgasdrivna fordon i samband med olika situationer. De situationer man har intresserat

sig för är krock, tankning av fordonet samt i slutna utrymmen som tunnlar och garage. Syftet med dessa studier är bland annat att se över hur dessa risker förhåller sig till de tekniska bestämmelserna för fordonen i samband med uppdateringar av dessa bestämmelser för marknader såsom USA, Japan, Kanada och Europa. Ett område som man har fokuserat på är riskerna med explosiv blandning av vätgas och luft inne i fordonets kupé. Slutsatserna är att det går att hålla nere vätgaskoncentrationen i kupéutrymmet en bil eller en buss till under den nedre explosionsgränsen om man från början konstruerar ventilationen för kupéutrymmet på ett bra sätt. (9) Ett annat område är hur mycket läckage som kan tillåtas vid en kollision för att inte riskera en efterföljande brand. I USA tillämpas FMVSS 301 för maximalt tillåten mängd bensinläckage efter kollision och FMVSS 303 för mosvarande för CNG fordon (9). Efter beräkningar och praktisk provning i Japan (JARI) (10) har man konstaterat att den maximalt tillåtna läckagemängden av vätgas efter en kollision är 131 NL/min (11,8 g/min) för att skapa likvärdig säkerhetsnivå som ett fordon drivet med bensin. Motsvarande siffra för metan är 40 NL/min (28,6 g/min). Vätgasläckage under flödande och transienta förhållanden kan tillåtas komma upp i nära 8-10 % koncentration utan att antändas. Detta är högre än det normala värdet på nedre explosionsgränsen (LEL) som är 4%. Standarden SAE J2578 har uppdaterats för att ta hänsyn till detta för att inte skapa onödigt hårda krav (9).

10.3 Spontan antändning av vätgas

Några fall av brandincidenter har inträffat vid fasta tankanläggningar när säkerhetsventiler har öppnat på grund av högt tryck i vätgastankar. Den tänkta säkerhetsproceduren är att när säkerhetsventilen öppnar leds gasen ut till den omgivande atmosfären via ett vertikalt utsläppsrör som normalt slutar vid en säker högt placerad punkt långt ifrån både potentiella tändkällor eller känslig utrustning. Den utsläppta gasen späds snabbt ut med den omgivande atmosfären och blir därigenom ofarlig. Vad som i några fall har inträffat, är att vätgasen har antänts vid utloppsröret och brunnit med fast låga så länge som utsläppet pågått. Det gick inte att hitta några naturliga förklaringar till varför denna antändning skedde och flera utredningar startades upp. Flera rapporter bekräftar nu att det finns mekanismer som sätts igång när vätgas under högt tryck plötsligt släpps ut via ett utsläppsrör (11) (12) (13) (14) (15). Tryckvågen som bildas skapar små lokala punkter med förhöjd temperatur. Energin från dessa små punkter är tillräckligt hög för att antända vätgas-luft blandningen. Detta fenomen uppstår på två olika platser, den ena platsen är inuti röret på väg mot utsläppspunkten och den andra platsen är precis ovanför och i ytterkant vid rörmynningen. Faktorer som påverkar sannolikheten för detta fenomen är trycket på gasen som släpps ut, gashastigheten, rördiameter och rörlängd. Forskningen verkar hittills inte ha resulterat i några bra rekommendationer hur detta fenomen med självantändning på ett effektivt sätt skall förebyggas. Vad man kan göra är att vara noggrann med placeringen av utblåsningarna så att en eventuell antändning ej resulterar i ytterligare brandspridning. De incidenter som har inträffat har inte lett till allvarligare bränder utan slocknat automatiskt när gastillförseln har avbrutits.

10.4 Analys av beräkningsmodeller för utsläpp i slutna utrymmen

Flera jämförande studier har genomförts för att bedöma hur bra de teoretiska beräkningsmodellerna stämmer med resultat från verkliga provningar. Beräkningsmodellerna som förekommer är alla av typen numeriska strömningsberäkningar ”computational fluid dynamics modeling” (CFD).

Bedömningar bekräftar att dessa beräkningsmodeller kan användas som en tillförlitlig predikteringsmetod för att utvärdera säkerheten för situationer där faktiska provresultat inte är tillgängliga (9) (16) (17) (18). Dock är det mycket viktigt att beräkningsmodellen inkluderar de parametrar som är väsentliga för explosionsförloppet som exempelvis mängden och spridningsriktningen av gasen, formen för den aktuella tunneln, utrustning inuti tunneln som påverkar turbulensen och trafiksituationen i tunneln.

10.5 Brandprovning av vätgasfordon samt vätgastank

Det finns ett antal olika regelverk (SAE, ISO, JARI, CSA, ANSI m fl) som föreskriver brandprovning (bonfire test methodologies) för behållare för vätgas (9). Dessa provningsmetoder är mycket lika de som gäller för CNG behållare. Det pågår en hel del arbete att göra dessa provningsmetoder mer repetitiva samt också att se över behovet av kompletterande brandprovningar (9).

Forskare har konstaterat att dagens brandprovningar kan producera väldigt olika resultat om man varierar ett antal testparametrar under testerna. Dessa testparametrar är ej definierade i testmetoden vilket är en stor brist. Man har också konstaterat att dessa brandprovningar inte alltid speglar en verklig brand i ett fordon. Man rekommenderar att genomföra brandprovning av verkliga fordon för att åstadkomma säkrare resultat (9). Man nämner också den europeiska provningen enligt ECE R-34 som mer lämplig. Erfarenheter visar att brandprovningar på tankar fyllda med alternativa gaser istället för vätgas, för en säkrare provningshantering, ger missvisande resultat vad det gäller tryck som behövs för att aktivera tryckavlastningsventilen samt även starttiden för densamma. Generellt kan sägas att resultaten från de olika brandprovningarna inte visar på någon speciellt förhöjd risk för vätgasfordon vid brand än för andra fordon som drivs med CNG eller bensin. De påpekar också att en uppåtriktad ventilation inte alltid är fördelaktig. Den kan vara negativ vid parkering i parkeringshus samt om fordonet har slagit runt (9) (10).

10.6 Brandprovning på trycktank med havererad säkerhetsventil (PRD)

Ganska mycket energi har lagt på att ta reda på konsekvenserna av en brand om tryckavlastningsventilen (PRD) har slutat att fungera (9). Man vill veta vad som händer om tanken utsätts för direkt brand och PRD-ventilen inte löser ut trots att trycket stiger. Verifierad provning har genomförts på 350 bars tankar av typ III samt typ IV. Typ III brandprovning genomfördes med tank monterad på en SUV och typ IV brandprovning genomfördes på lös tank (9). De väsentligaste slutsatserna från dessa tester var följande: Typ III tanken brast efter 12 min 18 sek och typ IV tanken brast efter 6 min 27 sek. Enligt beräkningar har tryckvågen från bilprovet kraften att spräcka trumhinnan 15 meter bort och spräcka fönster 20 meter ifrån bilen. Eldklotet som skapades av explosionen hade en diameter på mellan 8-24 meter. Energi från flaman var ungefärligen 340 kW/m². Beräkningar baserat på provningen på den lösa tanken indikerar att delar av tanken kan flyga iväg upp till 82 meter samt att vissa fragment av fordonet kan flyga iväg cirka 100 meter.

Brandprovning på typ IV tank stående lös, enligt fastställd provningsmetodik, höjde i vissa fall vare sig tryck eller temperatur inuti tanken så mycket att vare sig den tryck- eller den temperaturaktiverade ventilen (PRD) löser ut. Detta indikerar att dessa under vissa unika förhållanden vid en riktad flamma mot tanken inmonterad i fordonet inte skulle lösa ut (9).

10.7 Risker med lagring av flytande väte i fordon

Om vätet förvaras i nedkyld flytande form (Liquified hydrogen (LH₂)) i fordonstank kan man få med sig mer väte och därigenom förlänga körsträckan väsentligt mellan tankningarna. Det forskas mycket inom detta område. En risk som uppmärksammas vid denna typ av förvaring är att väte hela tiden måste koka av (alltså avges till omgivningen i gasform) för att bibehålla den låga temperaturen samt det låga trycket i bränsletanken. Detta innebär risker när fordonet är parkerat i slutna utrymmen (9). Exempelvis BMW arbetar på avancerade säkerhetssystem på fordonet för att lösa dessa problem (boil-off management system (BMS)) (9). Dessa system bygger i princip på att man utformar bränsletankar och rörsystem så att de kan tåla förhöjda tryck när fordonet står parkerat samt även att systemen är bättre isolerade från omgivande temperatur. BMW presenterade 2006 ett koncept med en katalysator som omvandlar det utsläppta vätet till vatten istället för att undvika risker med utsläpp av vätgas (3).

10.8 Lärdomar från olyckor med fordon drivna av naturgas (CNG)

I USA har man analyserat olycksstatistiken för fordon drivna med naturgas (CNG) eftersom det finns ganska många sådana fordon i trafik och man har bedömt att mycket av lärdomarna från dessa olyckor är relevanta för vätgasdrivna fordon (9). Dessa fordon kallas i USA för "compressed natural gas vehicles (NGVs)". Sedan år 2000 har det varit över 20 haverier på dessa typer av fordon. Över hälften av dessa har varit haverier orsakade av bränder. Vid majoriteten av dessa fordonsbränder blev tanken utsatt för brand på ett sådant sätt att den temperaturaktiverade PRD-ventilen ej löste ut som den skulle (9). Speciellt incidenten i Seattle i mars 2007 där tanken exploderade leder till ifrågasättande av gällande testmetodik för brandprovning av gastank. En annan olycka som uppmärksammats är ett fall med ett CNG fordon som hade utsatts för en lättare kollision som ledde till att fordonets ordinarie batteri läckte batterisyra på CNG tanken. Detta hade inte uppmärksammats och fordonet fortsatte att användas. Cirka 3 veckor senare exploderade CNG tanken under tankning av fordonet och föraren omkom. Lärdomen från denna olycka är att man måste utföra noggranna kontroller efter inträffade olyckor innan ett skadat fordon tas i trafik igen (9).

10.9 Analys av risker i tunnlar

Flera studier har genomförts för att analysera risker i slutna utrymmen. Analyser har genomförts både för tunnlar och för parkeringshus. Vad det gäller tunnlar så har behovet varit att utreda påverkan från tunnelns form och påverkan från detaljer i tunneln på tryckvågans utbredning och styrka vid deflagration samt vid detonation. Man har konstaterat att högt placerade detaljer påverkar tryckvågans utbredningshastighet mer än lågt placerade. Andra väsentliga parametrar som varit intressanta har varit ventilationssystem samt påverkan från fordonens PRD-ventiler och placeringen av dessa. Studierna har genomförts både som praktisk provning och som CFD modellering. Vid studier av hur tryckvågans utbredning påverkas av mängden högt placerade detaljer har man kommit fram till intressanta skillnader mellan vätgas och metan (19). En första ökning av antalet störande detaljer ökar det uppnådda maximala explosionstrycket för både vätgas och metan men ytterligare ökning tenderar att sänka det maximala trycket för vätgas men inte för metan. Man har också jämfört det uppnådda maximala explosionstrycket för vätgas och för metan under samma förhållanden. Dessa resultat påvisade 4 gånger högre tryck för vätgas än för metan (19). De praktiska resultaten samt också beräkningarna visar att ett signifikant övertryck kan erhållas i slutna eller halvslutna utrymmen genom antändning av en väte-luft blandning

som enbart fyller upp några få procent av det aktuella utrymmet. Detta kan leda till kraftiga skador på tunnelinstallationerna som t ex ventilationssystem (19) (20). För högre procentuell fyllning av väte-luft blandning kan man inte utesluta att en deflagration övergår till detonation i fall då tunneln har signifikant mängd detaljer som påverkar tryckvågans utbredning.

För simuleringar av explosioner i tunnlar har man begränsat sig, dels vad det gäller tunneldimensioner, geometrier och tunnellängder och dels vad det gäller aktuella fordon. Fordon som har förekommit i simuleringarna har varit följande:

- Buss med komprimerad vätgas med totalt 40 kg vätgas fördelat på 8 tankar till ett totaltryck på 350 bar.
- Bil med komprimerad vätgas med totalt 5 kg vätgas i 1 tank med ett totaltryck på 700 bar.
- Bil med förbränningsmotor med totalt 10 kg flytande väte.

Analyserna påvisar också att det är mycket komplext att analysera risker med vätgasfordon i tunnlar. Riskerna påverkas i hög grad av utformningen av tunneln. Det är en stor fördel att undvika detaljer som kan störa luftflödet i övre delen av tunneln som t ex lampor för belysning mm. Det är också en stor fördel om det är högt till tak i tunneln så att utsläppt vätgas snabbare kan späs ut och också komma bort ifrån de flesta potentiella tändkällorna (19) (16). En åtgärd för att minska riskerna för explosion i tunnlar är att öka ventilationsgraden och därigenom sänka koncentrationen av eventuella utläckande explosiva gaser. Detta är också något som rekommenderats från projektet HyTunnel (19).

Simuleringar har också genomförts med generella utsläpp av 10 kg vätgas. Vid dessa simuleringar har man konstaterat att tidig antändning av gasblandningen medför hög lokal temperaturpåverkan och relativt låg tryckpåverkan och att en sen antändning ger låg temperaturpåverkan men däremot en stor tryckpåverkan. Vid en jämförelse med ett konventionellt fordon drivet med bensin så ger ett vätgasdrivet fordon lägre temperaturpåverkan men en högre tryckpåverkan (12) (21).

CFD simuleringar har också påvisat att om stora utsläpp av vätgas antänds kan det bli ett underskott av syre i flammen. Detta kan leda till kraftigt förhöjd temperatur i överkant av tunneln även på långa avstånd som kraftigt kan skada tunnelns infrastruktur (20).

Hittills har det inte gått att hitta någon information om genomförda analyser eller utredningar kring undermarksrelaterade risker kopplat till transportfordon lastade med väte i komprimerad form eller i nedkyld flytande form. Här handlar det om väsentligt större mängder väte som blir aktuellt att analysera.

10.10 Listning av några omfattande analyser

Nedan följer summeringar av några av de analyser som bedömts vara mest omfattande och relevanta för denna studie.

10.10.1 Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research.

Detta är en studie genomförd av National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (9) som är en underavdelning till US Department of Transportation. Rapporten är utfärdad februari 2010 och har rapportnummer DOT HS 811 267. I denna studie har NHTSA samlat alla kända rapporter och utredningar som har bäring på säkerhet för vätgasfordon. Rapporten är mycket omfattande och innehåller många intressanta slutsatser. En del av de intressantaste ingår i texten i föregående kapitel.

10.10.2 Miljökonsekvensbeskrivning – LNG terminal, Göteborgs hamn

Som ett led i projekteringen av en LNG terminal i Göteborgs hamn har det genomförts en miljökonsekvensanalys som är beskriven i detta dokument. Denna beskrivning utgör en bilaga till ansökan om tillstånd för miljöfarlig verksamhet enligt miljöbalkens 9:e kapitel. Denna analys hanterar inte riskerna i samband med vidare transport av LNG via väg samt järnväg men man har bedömt kvantiteter per transportenhet för lastbil till genomsnittlig lastningsvolym av 50 m³. Individuell tankstorlek är max 60 m³ och för järnvägsvagn till individuell tankstorlek på max 105 m³.

Man har också bedömt utbredning av ett explosivt moln vid kraftiga läckage av LNG vid värsta fall av väderlek (vidriktning och vindhastighet) vilket kan vara intressant som jämförelse.

Enligt uppgifter i denna analys för Göteborgsanläggningen (LNG) utfärdad december 2013 är regelverken kring järnvägstransport av LNG inte ännu fastställt.

11 Summering av risker i vägtunnlar

Ur risksynpunkt är det två scenarior som är intressanta att analysera. Riskerna vid normal ostörd trafik får bedömas vara försumbara i detta sammanhang. De scenarior som är intressanta att analysera är dels vid mer eller mindre stillastående trafiksituation och dels vid trafikolycka.

11.1 Risker vid stillastående trafik

Detta scenario gäller när det blir så kraftig köbildning, på grund av trafiksituationen, att alla fordon står mer eller mindre stilla i tunneln under en längre tid.

11.1.1 Vätgasdrivet fordon

Risken att ett vätgasdrivet fordon skulle läcka så mycket vätgas att det skulle bildas en explosiv blandning i en tunnel får anses som mycket osannolik. Dels är bränslesystemet mycket tillförlitligt och dels är de potentiella läckagemängderna för små för att i en tunnel skapa en explosiv blandning med omgivande luft.

11.1.2 Transport av komprimerad vätgas

Man strävar efter att kunna transportera mer vätgas per lastbil. För att åstadkomma detta krävs att trycket i vätgasbehållarna höjs. Teknisk löser man detta med fler behållare med högre tryck. Systemen blir i och med detta mer komplexa och innebär sannolikt fler potentiella läckagerisker. Sammantaget får man nog bedöma att risken är relativt låg för denna typ av läckage.

11.1.3 Transport av flytande väte

Vid transport av flytande väte pågår hela tiden en avdunstning av vätet för att kunna bibehålla den låga temperaturen samt det låga trycket inuti behållaren.

Denna avdunstningsmängd är relativt konstant över tiden och bör kunna beräknas enligt följande. Om man räknar på den största potentiella lastmängden per lastbil är denna 4300 kg enligt aktuella bedömningar. Detta tillsammans med en avdunstningsmängd på 0,6% per dygn skulle ge en avdunstning på 1 kg/timme. Ett allra värsta scenario skulle då kunna producera 0,3-5 liter explosiv gas/luft-blandning per minut. Riskerna med denna produktion av gasblandning beror i sin tur på geometrier i aktuell tunnel samt den aktuella ventilationsgraden. I tunneln bör fickor i de övre regionerna undvikas och god ventilation ombesörjas.

11.2 Risker vid trafikolycka

11.2.1 Trafikolycka med vätgasdrivet fordon

Vid trafikolycka finns det risk att bränslesystem skadas och att detta kan leda till bränsleläckage. Detta gäller alla former av bränslesystem. Flytande bränslen kan rinna ut och orsaka brand eller explosion om det antänds av t ex. en varm yta eller en gnista.

Gasformiga bränslen kan också läcka ut och på samma sätt antändas.

Vätgasdrivna fordon har säkerhetssystem som stänger av tillförsel av vätgas från tankarna vid en trafikolycka. Detta medför att mängden vätgas som eventuellt skulle läcka ut vid en trafikolycka sannolikt blir mycket liten. Den utläckande gasen kommer dessutom att sträva uppåt vilket i de allra flesta olycksituationer är mycket gynnsamt. Risken för en explosiv gasblandning uppstår i fallet då vätgasen blir fast i ett slutet utrymme i bilen.

Olycka med vätgasdriven personbil

Sannolikheten att själva gastankarna blir så skadade att de börjar läcka gas är liten, dels med tanke på den skyddade placeringen i fordonet och dels med tanke på tankkonstruktionen som är gjord för att tåla mycket höga tryck. Det är en praxis att optimera tankarnas placering så att de är så skyddade som möjligt för kollisioner från alla riktningar.

Vid en mycket kraftig krock är det inte helt otänkbart att en av tankarna skadas så att vätgasen läcker ut. Konsekvenserna av ett sådant utsläpp beror i sin tur på hur snabbt vätgasen läcker ut, eventuella närliggande tändkällor, på tunnelgeometrier samt ventilation. Ett läckage kan antändas tidigt nära utsläppspunkten och då ge upphov till en brand eller antändas på större avstånd från utsläppskällan och då ge upphov till en explosion. Den totala energin i vätgasen är dock mindre än exempelvis den energi som finns i en fulltankad bensindriven bil. Exempelvis 8 kg vätgas motsvarar i värmeenergi cirka 22-24 liter bensin. De flesta biltillverkare verkar inrikta sig mot att använda sig av en maximal vätgasmängd på 5-6 kg.

Olycka med vätgasdriven buss

Det är svårare att bedöma riskerna för en vätgasdriven buss som krockar eftersom placeringen av tankarna samt också antal tankar och tankstorlek kan förväntas variera i mycket högre grad mellan de olika bussfabrikaten och modellerna än vad det gör för personbilarna. Trots detta får det nog bedömas vara begränsad sannolikhet för en allvarligt skadad tank och vätgasutsläpp även för en buss inblandad i trafikolycka. Konsekvenserna av ett utsläpp beror även här på hur snabbt vätgasen läcker ut, eventuella närliggande tändkällor, på tunnelgeometrier samt ventilation. Ett läckage kan antändas tidigt nära utsläppspunkten och då ge upphov till en brand eller antändas på större avstånd från utsläppskällan och då ge upphov till en explosion.

Efterföljande brand

En trafikolycka kan övergå till en fordonsbrand. Ett tänkbart scenario är att branden startar i ett av de övriga inblandade fordonen och sprider sig till vätgasfordonet.

Då finns risk att vätgassetemet efter hand blir utsatt för höga temperaturer. Normalt är ventilerna från vätgastankarna stängda vilket gör att det yttre vätgassetemets bidrag till branden blir mycket begränsad.

En yttre brand i närheten av vätgastankarna kommer efter en stund att utlösa de inbyggda säkerhetsventilerna som kontrollerat släpper ut vätgasen via evakueringsrör för att förhindra tryckhöjning inuti tankarna. Detta kommer med hög sannolikhet att öka intensiteten av den redan pågående branden. Ökningen i intensitet beror på mängden vätgas som förvaras i tankarna. En personbil har med sig relativt liten mängd vätgas medan en buss kan tänkas föra med sig väsentligt mycket mer.

Vätgastankar är försedda med säkerhetsventiler som skall lösa ut vid förhöjd temperatur eller förhöjt tryck. Om dessa inte fungerar som de skall finns det risk för tankexplosion som beroende på placeringen av tankarna kan ge omfattande splitterskador. Sannolikheten för en sådan explosion bedöms dock som mycket låg eftersom obligatorisk brandprovning, som skall efterlikna detta fall, ingår i fordonens obligatoriska typkontroll. Dock har det hänt att dessa säkerhetssystem har satts ut spel för CNG-fordon under mycket sällsynta förutsättningar (jetflamma riktad mot en sådan punkt på tanken där den förhöjda temperaturen inte når fram till temperaturavkännaren). Detta scenario är mycket osannolikt vid en fordonsbrand men kan dock inte helt uteslutas även för ett vätagasfordon.

Det förväntade scenariot vid en större brand i en vätagasdriven bil är att dock att säkerhetsventilerna löser ut efter det branden har pågått en viss tid. Den förväntade tiden hur snart dessa ventiler löser ut beror på hur snabbt brandtemperaturen runt dessa ventiler ökar. Resultatet blir en ökning av brandintensiteten, en kraftig flamma vars storlek och riktning påverkas av utsläppspunktens placering och riktning.

11.2.2 Trafikolycka med lastbil lastad med komprimerad vätagas

Tankarna är skyddade av en kraftig ramkonstruktion som skall skydda lasten vid en trafikolycka. Dock är inte ramkonstruktionen heltäckande vilket gör att det ändå finns en viss risk för att någon av vätagastankarna blir skadad och börjar läcka. Bedömning är att transporterad mängd komprimerad vätagas är cirka 500-1000 kg per fordonsekipage. Trenden verkar vara, åtminstone för Europa, att denna volym blir fördelad på ganska många behållare. Kanske så många som 60-70 stycken.

Det är mycket osannolikt att fler än några enstaka behållare börjar läcka vid en kraftig trafikolycka i en tunnel. Konsekvenserna av ett utsläpp beror även här på hur snabbt vätagasen läcker ut, storleken på berörda behållare, eventuella närliggande tändkällor, på tunnelgeometrier samt ventilation. Ett läckage kan antändas tidigt nära utsläppspunkten och då ge upphov till en brand eller antändas på större avstånd från utsläppskällan och då ge upphov till en explosion. Följdverkningarna på de återstående behållarna vid en sådan brand eller explosion är mycket svårbedömda.

Det är svårbedömt vad som händer om det börjar brinna i behållarnas omedelbara närhet. Avgörande för förloppet är om behållarnas säkerhetssystem släpper ut gas eller ej när temperatur och tryck börjar stiga på grund av branden. En seriereaktion i form av ett antal explosioner kan inte uteslutas. Det är också svårt att bedöma hur snabb denna seriereaktion blir och hur kraftiga explosionerna blir.

11.2.3 Trafikolycka med lastbil lastad med nedkylt kondenserat väte

Vid en mindre trafikolycka är det liten risk att behållaren för vätet blir skadad. Dock kommer den att börja avdunsta vätagas (se kapitlet ovan ”Risker vid stillastående trafik”). Vid en kraftig olycka finns det viss risk för att behållaren blir skadad så att kondenserad nedkyld väte börjar läcka ut. Det kalla vätet kommer att rinna ut i alla riktningar och efter hand förångas och stiga uppåt. Det kommer att bildas ett explosivt moln med en mycket hög koncentration av väte i mitten och låg koncentration i ytterkanterna. Utbredningen i sidled påverkas av läckagehastigheten, tiden samt ventilationsförhållandena. Vid detta scenario är risken för brand eller explosion mycket stor.

Det är svårbedömt vad som händer om det börjar brinna i den nedkylda tankens omedelbara närhet. Sannolikt kommer volymerna av utströmmat väte att öka efter hand och denna mängd kommer att bidra till brandutvecklingen. En seriereaktion i form av ett antal explosioner kan inte heller här uteslutas. Det är också svårt att bedöma hur snabb denna seriereaktion blir och hur kraftiga explosionerna blir.

12 Summering av risker i järnvägstunnlar

12.1 Stillastående tåg i tunnel

Ett tåg lastat med komprimerad vätgas som blir stående i en tunnel skulle kunna ge upphov till ett vätgasläckage ifall någon tankanslutning läcker. Sannolikheten för ett sådant läckage är mycket liten och det är också liten sannolikhet att det skulle bli så omfattande att ett explosivt moln skulle bildas.

Ett tåg lastat med kondenserad nedkyld väte kommer att ge upphov till en avdunstning av väte för att kunna bibehålla den låga temperaturen samt det låga trycket inuti behållaren. Denna avdunstningsmängd är relativt konstant över tiden och bör kunna beräknas baserat på transporterad mängd väte tillsammans med en avdunstningsmängd på 0,6% per dygn. Riskerna med denna produktion av gasblandning beror i sin tur på geometrier i aktuell tunnel samt den aktuella ventilationsgraden. Man skall undvika fickor i de övre regionerna av tunneln samt se till att det finns god ventilation.

12.2 Allvarligare urspårning

Vid en urspårning som leder till utsläpp av vätgas finns risker för efterföljande brand eller explosion.

Om tåget är lastat med komprimerat väte kommer detta vid ett läckage att stiga uppåt och samlas i tunnelns övre regioner och bilda ett brännbart moln som kommer att spridas utefter taket i de riktningar som leder uppåt.

Om tåget är lastat med nedkyld flytande väte kommer detta först att uppföra sig som en brännbar vätska och spridas utefter marken. Allteftersom vätet förångas kommer det att stiga uppåt och uppföra sig på samma vis som den komprimerade gasen. Området med brännbar och explosiv blandning med luft kommer att vara väsentligt mycket större än för fallet med komprimerad gas. Utbredningen i sidled påverkas av läckagehastigheten, omgivande temperatur, tiden samt ventilationsförhållandena.

Sannolikheten för en antändning av den utströmmande gasen är större än för flera andra gaser eftersom väte behöver liten antändningsenergi och också har ett mycket brett brännbarhetsområde. En brand i en tankvagn med nedkyld flytande väte kommer att vara extremt svår att släcka eftersom den utströmmande vätskan först kommer att kondensera eller frysa ner den del av omgivningen den kommer i kontakt med, sedan kommer gasen att uppföra sig som en tung gas och slutligen som en lätt gas.

13 Summering av risker i enskilda garage

Vätgasdrivna fordon har ett antal säkerhetssystem för att förhindra gasläckage.

Sannolikheten för ett läckage är mycket låg och om det skulle inträffa kommer det att vara ett mycket litet utsläpp. Problematiken för enskilda garage är att de i allmänhet inte har någon bra ventilation. Risken är att en liten mängd vätgas som har fastnat i överkant ett slutet garage skullen kunna antändas och explodera. Denna risk får dock bedömas som ytterst liten och inte högre än för andra gasdrivna fordon eller motsvarande brandrisk för fordon som drivs med bensin.

14 Summering av risker i underjordiska parkeringshus

Vätgasdrivna fordon har ett antal säkerhetssystem för att förhindra gasläckage. Sannolikheten för ett läckage är mycket låg och om det skulle inträffa kommer det att vara mycket litet. Till skillnad för enskilda garage är i allmänhet underjordiska parkeringshus utrustade med ventilationssystem. Det är mycket osannolikt att en tillräckligt stor ansamling av vätgas skulle bildas så att förutsättningar för en explosion skulle vara aktuell.

En bilbrand i ett underjordiskt parkeringshus skulle kunna sprida sig till en vätgasdriven bil. Brandintensiteten skulle då öka på liknande vis som vid en trafikolycka (se kapitlet ovan). Det sannolikaste scenariot är att säkerhetsventilen löser ut och en kraftig flamma skapas som förvärrar branden. Eftersom det är en relativt liten mängd vätgas i tankarna kommer den totala energin som tillförs branden att vara mindre än för motsvarande bensindriven bil.

Om säkerhetssystemet inte fungerar som de skall finns det risk för tankexplosion som beroende på placeringen av tankarna kan ge omfattande splitterskador. Sannolikheten för detta är dock extremt låg.

15 Rekommendationer till fortsatta utredningar och aktiviteter

Syftet med denna utredning har varit att identifiera och analysera relevanta problemställningar för att fastställa de faktiska riskerna med vätgasdrivna fordon och transporter av vätgas i tunnlar och andra slutna utrymmen i jämförelse med konventionellt drivna fordon och transport av tillhörande drivmedel.

Mycket arbete har lagts ner internationellt för att både förstå riskerna förenade med hantering av väte som fordonsdrivmedel och även att säkerställa att detta inte leder till oönskade risker. För Sveriges del så har vi ännu så länge mycket begränsade egna erfarenheter.

Man kan också konstatera att regelverken kring tunnelsäkerhet traditionellt är fokuserade på brand i mycket hög grad. Riskerna för explosion och effekterna av inträffade explosioner har tyvärr inte fokuserats i regelverken på samma vis.

Som resultat av den genomförda utredningen finns det ett antal områden där ytterligare utredningsarbete är att rekommendera:

15.1 Transporter av väte både i form av komprimerad gas och i form av nedkyllt flytande väte

Det har inte gått att hitta information om riskerna vid transport av större mängder väte genom tunnlar. Detta gäller framförallt effekterna av en större vätgasexplosion i tunnel. Mindre volymer som förekommer i vätgasdrivna personbilar samt också vätgasdrivna bussar är noggrant analyserade både genom praktisk provning och olika simuleringsprogram, men inga analyser har genomförts för större volymer.

Det bör utredas vilka alternativa scenarior som finns vid en brand i en lastbil lastad med komprimerad vätgas både på öppen väg och inuti en tunnel. Hur kommer branden att utveckla sig? Hur effektiva är säkerhetssystemen vid en brand? Hur riktas branden när säkerhetsventilerna löser ut? Kan det ske en eller flera explosioner? Seriereaktioner?

Vilken omfattning blir det på branden eller explosionerna och vilken påverkan blir det på omgivningen?

Det bör utredas vad som händer vid ett läckage av nedkyllt kondenserat väte vid t. ex. en olycka inuti en tunnel. Detta gäller både för transport på väg och på järnväg. Hur kommer utbredningen av vätet att se ut, vilka faktorer påverkar förångringshastigheten och läckagehastigheten, vilka tändkällor bör man räkna med och var finns dessa (exempelvis kan kontaktledningen i en järnvägstunnel kanske vara en tändkälla), hur startar en brand och hur kan en explosion ske och vilka krafter skapas? Det är extremt svårt att bedöma dessa mekanismer och hur de hänger ihop.

15.2 Effekterna av brand i parkeringshus samt enskilda garage

Det har inte funnits möjligheter att inom ramarna för detta uppdrag gå igenom Boverkets regelverk kring risker kopplade till hantering av gasdrivna fordon i underjordiska parkeringshus samt enskilda villagarage. En rekommendation är att utreda hur Boverkets regelverk täcker dessa risker både kopplat till brand och explosion, och då specifikt vätgasens risker men att även i viss mån inkludera andra explosiva gaser.

15.3 Strategier och taktik vid trafikolyckor samt vid pågående bränder

Det är viktigt att räddningstjänsten som kommer fram till en olycka, där ett vätdrivet fordon eller ett fordon som transporterar väte är inblandat, vet hur de skall förhålla sig för att hantera situationen på bästa sätt. Allteftersom kunskaperna kring både vätetets risker och de tekniska utformningarna ökar bör personal inom räddningstjänsten utbildas så att beredskapen för att hantera de olika riskscenarierna blir så god som möjligt. Det krävs ett tvärfunktionellt centraliserat samarbete för att åstadkomma detta.

16 Litteraturförteckning

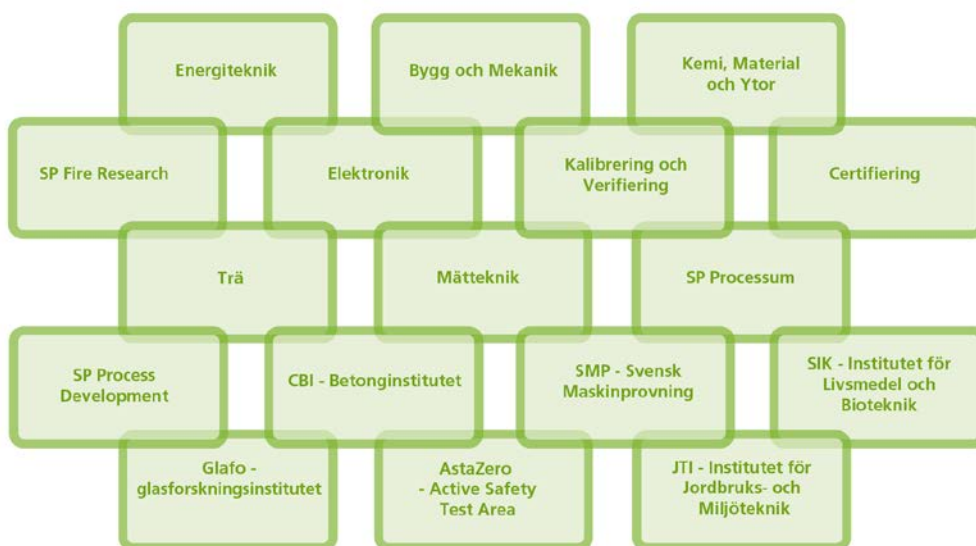
1. **Sveriges Riksdag.** *Svensk författningssamling 2006:263. Lag (2006:263) om transport av farligt gods.* Sverige : u.n., 2006.
2. **Enström, Karin.** *SFS 2013:544 Förordning om ändring i förordningen (2006:311) om transport av farligt gods.* u.o. : Regeringen, 2013.
3. **BMW.** BMW Media information. [Online] 11 2006.
4. **Air Products.** *Air Products' innovative SmartFuel® technology marks the next step in hydrogen infrastructure deployment.* u.o. : Air Products Media Team, 2014.
5. **National Renewable Energy Laboratory, A national laboratory of the U.S. Department of Energy.** *Costs of storing and transporting hydrogen.* USA : u.n., November 1998.
6. **Department of Energy.** *III.6 Development of High Pressure Hydrogen Storage Tank for Storage and Gaseous Truck Delivery.* USA : u.n., 2012.
7. **Swedegas AB, Vopac LNG Holding BV.** *Miljökonsekvensbeskrivning – LNG terminal, Göteborgs hamn (bilaga B) 2013-09-09.* Sverige : u.n., 2013.
8. **Fuelcellpark.** *www.fuelcellpark.com.* [Online]
9. **National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).** *Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. Report No. DOT HS 811 267 Report Date February 2010.* USA : u.n., Februari 2010.
10. **Japan Automobile Research Institute (JARI).** Japan : u.n.

11. **Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University.** *Spontaneous Ignition of Pressurized Releases of Hydrogen and Natural Gas into Air.* NJ, USA : u.n.
12. —. *Further studies on Spontaneous Ignition of Compressed Hydrogen Releases into Air.* NJ, USA : u.n.
13. **Health and Safety Laboratory .** *Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms.* England : u.n.
14. **International Journal of Hydrogen Energy (2010).** **Yamada E, et al.** *Mechanism of high-pressure hydrogen auto-ignition when spouting into air.* Doi:10.1016/j.jhydene.2010.05.011.
15. **Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University.** *Spontaneous Ignition of Pressurized Releases of Hydrogen and Natural Gas into Air.* USA : u.n.
16. **Gexcon AS.** *CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels.* Norge : u.n.
17. **Research Center Karlsruhe.** *Numerical Simulation And Safety Of Tunnel Accidents With A Hydrogen Powered Vehicle.* Tyskland : u.n., 2000.
18. **Sandia National Laboratories and SRI International.** *Simulation of Hydrogen Releases from Fuel-Cell Vehicles in Tunnels.* USA : u.n.
19. **HyTunnel projekt.** *To investigate the use of hydrogen vehicles in road tunnels.*
20. **Department of Chemical and Process Engineering, Sheffield University.** *Initial Assessment of the Impact of Jet Flame Hazard From Hydrogen Cars In Road Tunnels.* England : u.n.
21. **Institute of Nuclear and Energy Technologies and BMW AG.** *Numerical Simulation And Safety Evaluation Of Tunnel Accidents With A Hydrogen Powered Vehicle. Presenterat på World Hydrogen Energy Conference, China 2000.* Tyskland : u.n., 2000.
22. **BRE Fire and Security.** *Fires in Enclosed Car Parks.* 2007.
23. **Danish Emergency Management Agency, DEMA.** *Guidance: Emergency service operations at hydrogen service tank facilities.* 2012.
24. **Energy Partners.** *Safety issues of hydrogen in vehicles.* USA : u.n.
25. **Energigas Sverige.** *Åtgärder vid nödsituationer under transport av flytande metan (LNG och LBG) Tankbil och Tankcontainer.* Sverige : u.n.
26. **Europaparlamentet, EU.** *Europaparlamentets och Rådets förordning (EG) nr 79/2009 om typgodkännande av vätgasdrivna motorfordon och om ändring av direktiv 2007/46/EG.* EU : u.n., 2009.
27. **European Industrial Gases Association (EIGA).** *Safety in Storage, handling and distribution of liquid hydrogen.* DOC 06/02/E.
28. **Faculty of Technology, Telemark University College.** *A Hydrogen-air explosion in a Process Plant: A Case History.* Norge : u.n.
29. **Ford Motor Company.** *Hydrogen Vehicle Safety Report.* USA : u.n., 1997.
30. **Hyundai-Kia Motors.** *Emergency Response Guide, Tucson ix Fuel Cell Vehicle.*
31. **Mahytec.** *Hydrogen Storage Solutions.* Frankrike : u.n.
32. **McGill University.** *Explosion Hazards of Hydrogen-Air Mixtures.* Kanada : u.n.
33. **Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.** *Safe Hydrogen Infrastructure in Germany.* WHEC 2012. Tyskland : u.n., 2012.
34. **Räddningsverket.** *Räddningstjänst vid olycka med gaser.* Sverige : u.n.
35. **Sandia National Laboratories.** *Investigation of the Hydrogen Release Incident at the AC Transit Emeryville Facility.* CA, USA : u.n., 2012.
36. **Swedish Standards Institute.** **Teknisk kommitté (TK) 410, vätgasteknologi.** . Sverige : u.n.
37. **Telemark University College.** *Experiece from hydrogen explosions in industry.* Norge : u.n.
38. —. *A hydrogen-air explosion in a process plant: A case history.* Norge : u.n.
39. **The International Consortium for Fire Safety, Health & The Environment.** *Safety issues regarding fuel cell vehicles and hydrogen fueled vehicles.*

40. **The University of Sheffield, Dr. Yajue Wu.** *Initial Assessment of the Impact of Jet Flame Hazard From Hydrogen Cars In Road Tunnels*, 2008. England : u.n., 2008.
41. **Trafikverket.** *Definition av undermarksstation. Ingår i RAPPORT Tunnelsäkerhet - Berg- och tunnelteknik. Publ.nr: 2014:061.* Sverige : u.n., 2014.
42. —. *TRVK Tunnel 11: Trafikverkets tekniska krav Tunnel.* u.o. : Trafikverket, 2011.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Vi arbetar med innovation och värdeskapande teknikutveckling. Genom att vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling har vi stor betydelse för näringslivets konkurrenskraft och hållbara utveckling. Vår forskning sker i nära samarbete med universitet och högskolor och bland våra cirka 10000 kunder finns allt från nytänkande småföretag till internationella koncerner.



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

Elektronik

SP Rapport : 2014:72

ISBN 978-91-88001-24-5

ISSN 0284-5172