



# Brannsikkerhet og alternative energibærere: Gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere

Andreas Sæter Bøe

SP Fire Research AS



# Brannsikkerhet og alternative energibærere: Gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere

<b>VERSJON</b> 2	<b>DATO</b> 12.03.2018	<b>NØKKELOORD:</b> Brann Brannsikkerhet Gasskjøretøy Eksplosjon Tunnel Parkeringskjeller
<b>FORFATTERE</b> Andreas Sæter Bøe		
<b>OPPDRAGSGIVER</b> Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap	<b>OPPDRAGSGIVERS REF.</b> Berit Svensen og Jostein Ween Grav	
<b>PROSJEKTNR.</b> 20096:04	<b>ANTALLSIDER OG VEDLEGG:</b> 32 + 3 vedlegg	

## SAMMENDRAG

Denne litteraturstudien av brann- og eksplosjonsrisiko for gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere er en videreføring av et tidligere prosjekt utført ved SP Fire Research, *Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom*. I forhold til det tidligere prosjektet, bidrar denne rapporten med referanser til nyere litteratur og fokuserer på kjøretøy med CNG (komprimert naturgass) og hydrogen. Konsekvenser ved en eksplosjon i gasskjøretøy, norsk regelverk og forslag til sannsynlighetsreducerende tiltak diskuteres. Hovedkilden til denne litteraturstudien er en svensk rapport fra 2016.

Basert på denne studien foreslås det at videre arbeid i første omgang fokuserer på hvilken effekt en hydrogentank- og en hydrogenskyeksplosjon vil ha på typiske, norske parkeringskjellere.

<b>UTARBEIDET AV</b> Andreas S. Bøe	SIGNATUR	
<b>KONTROLLERT AV</b> Nina Reitan	SIGNATUR	
<b>GODKJENT AV</b> Paul Halle Zahl Pedersen	SIGNATUR	
<b>RAPPORTNR.</b> A 17 20096-04:01	<b>GRADERING</b> Åpen	<b>GRADERING DENNE SIDE</b> Åpen

## Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1	22.03.2017	Publisert internt hos DSB
2	12.03.2018	Gradering er omgjort til åpen. Følgende setninger er lagt til i sammendraget: <ul style="list-style-type: none"><li>- «Imidlertid kan alt elektrisk utstyr være potensielle antenneskilder, med mindre de er godkjent for bruk i eksplosive omgivelser.»</li><li>- «Det er imidlertid viktig at risikovurderinger er validerte og relevante for de faktiske forhold.»</li></ul>

---

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>4</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>Ordforklaringer</b>	<b>8</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>9</b>
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Målsetting	10
1.3 Metoder	10
1.4 Avgrensninger	10
<b>2 Regelverk</b>	<b>11</b>
2.1 Ansvarsfordeling	11
2.2 Gasskjøretøy generelt	11
2.3 Tunnel	12
2.4 Parkeringskjeller	13
2.5 Trykkavlastningsventiler for gasskjøretøy	15
2.6 Retningslinjer for redningspersonell	16
<b>3 Eksplosjonsrisiko i tunnel og parkeringskjeller</b>	<b>17</b>
3.1 Eksplosjon	17
3.2 Vegtunneler	17
3.3 Parkeringskjellere	18
3.4 Ikke-fungerende trykkavlastningsventiler	19
3.5 Redningsinnsatser i innelukkede rom	20
3.6 Risikoreduserende tiltak	21
<b>4 Diskusjon</b>	<b>22</b>
4.1 Tunneler	22
4.2 Parkeringskjellere	23
4.3 Gasstanker	24
4.4 Redningsinnsats	25
4.5 Vurdering av risikoreduserende tiltak	26
4.6 Brann- og eksplosjonsrisiko ved gasser	28
<b>5 Konklusjon</b>	<b>29</b>
<b>Referanser</b>	<b>31</b>
<b>A Person- og bygningsskader ved ulike eksplosjonstrykk</b>	
<b>B Brann- og eksplosjonsteori</b>	
<b>C Store parkeringskjellerbranner</b>	

## Sammendrag

Denne litteraturstudien av brann- og eksplosjonsrisiko for gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere er en videreføring av et tidligere prosjekt utført ved SP Fire Research, *Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom* [1]. I forhold til det tidligere prosjektet, bidrar denne studien med referanser til ny litteratur og fokuserer på kjøretøy med CNG (komprimert naturgass) eller hydrogen. I dag brukes CNG som drivstoff i mange busser i Norge, mens hydrogen forventes å brukes i både busser og personbiler fremover. Konsekvenser ved en eksplosjon i gasskjøretøy, relevansen av norsk regelverk og forslag til sannsynlighetsreducerende tiltak<sup>1</sup> diskuteres i denne rapporten, som benytter en svensk rapport fra 2016 som hovedkilde [2].

### Konsekvenser ved eksplosjon i gasskjøretøy i tunnel eller parkeringskjeller

Tunnelkonstruksjoner i Norge er robuste og har god ventilasjon som kan fortynne eventuelle gasslekkasjer. Imidlertid kan alt elektrisk utstyr være potensielle antenneskilder, med mindre de er godkjent for bruk i eksplosive omgivelser. Trykkbølgen fra en gasskyeksplosjon er ikke forventet å skade tunnelens integritet, men kan påføre lokale skader på personer, biler i nærheten og tunnelutrustning. Dagens regelverk vurderes å være generelt godt tilpasset den risikoen som gasskjøretøy utgjør med hensyn til tunnelkonstruksjonens integritet. Det er imidlertid viktig at risikovurderinger er validerte og relevante for de faktiske forhold.

Parkeringskjellere har få trykkavlastningsflater og bygningskonstruksjonen kan være mer sårbar enn en tunnel for en gasseksplosjon. Kapasiteten til ventilasjonssystemet i parkeringskjellere er ikke like stor som i tunneler, og et gassutslipp kan derfor være mer utfordrende å fortynne til en ikke-eksplosiv blanding. I Norge skiller ikke gjeldende regelverk for parkeringsbygg mellom kjøretøy med ulike drivstofftyper, og det er derfor ikke gitt spesifikke retningslinjer for gasskjøretøy.

### Vurdering av sannsynlighetsreducerende tiltak

Den svenske studien [2] foreslår de tre følgende tiltakene som de viktigste for å redusere sannsynligheten for at en gasstank skal eksplodere som følge av brann, her kommentert med tanke på norske forhold:

- *Forbedret teststandard og mer robuste tanker.* Brannteststandarden for CNG-tanker er ufullstendig beskrevet, og er ikke representativ for hvordan et ekte brannforløp kan utvikle seg. Selv om trykkavlastningsventilene på tankene i de aller fleste tilfeller fungerer slik de skal, er en rekke ulykker med CNG-tanker i løpet av de siste årene en indikasjon på at en gasstank kan eksplodere når den blir eksponert for brann. Standarden som hydrogentanker testes etter er mer fullstendig beskrevet og gir en mer realistisk branntest. Det har heller ikke vært rapportert om at hydrogentanker utsatt for brann har eksplodert. Om mangelen på rapporterte hendelser av eksplosjon i hydrogenkjøretøy som følge av brann skyldes at teststandarden er tilstrekkelig god, eller at det foreløpig finnes få hydrogenkjøretøy, vites ikke. Det er dermed

---

<sup>1</sup> Kost-nytte analyse er ikke utført i denne studien, og vil være nødvendig ved videre vurdering av tiltakene.

usikkert hvor stor effekt det vil ha å forbedre teststandarden for hydrogentanker.

- *Sprinkling av offentlige parkeringskjellere* vil ha en positiv effekt på å forhindre eller redusere konsekvensene av en hvilken som helst brann. På grunn av at CNG-tanker i noen tilfeller har eksplodert ved brann, kan sprinkling være et alternativ for å redusere eksplosjonsfaren for CNG-kjøretøy. Et sprinkleranlegg vil kjøle ned brannen og redusere sannsynligheten for brannspredning til et gasskjøretøy fra et annet kjøretøy. På grunn av manglende statistikk på branner i hydrogenkjøretøy, har vi ikke grunnlag til å vurdere om et sprinkleranlegg er et effektivt tiltak for å redusere sannsynligheten for eksplosjon i et hydrogenkjøretøy. Et sprinkleranlegg vil imidlertid uansett redusere sannsynligheten for at en bilbrann sprer seg til et hydrogenkjøretøy.
- *Tettere oppfølging av periodiske kjøretøykontroller*. I Sverige har det skjedd ulykker som følge av at feil på CNG-tanker, som kunne blitt oppdaget ved periodisk inspisering av kjøretøyet. Det er derfor viktig å ha et godt nok system som sørger for en jevnlig kontroll av gasstanker i kjøretøy.

### **Videre arbeid**

For å vurdere om tiltak er nødvendig for trygg parkering av gasskjøretøy i parkeringskjellere, foreslås det at videre arbeid i første omgang studerer hvilke konsekvenser en hydrogentank- og en hydrogenskyeksplosjon vil ha i typiske, norske parkeringskjellere.

## Summary

This literature review of fire and explosion risks for gas vehicles in tunnels and underground car parks builds on a previous study conducted at SP Fire Research: *Fire Safety and Alternative Energy Carriers: Electrical and Gas Vehicles in Enclosed Compartments* [1]. The current study contributes with references to newer literature and focuses on vehicles powered by CNG (compressed natural gas) or hydrogen. Today many buses in Norway are fueled by CNG, whereas hydrogen fuel cells are expected to be used in both buses and cars in the coming years. Consequences of an explosion, the national regulations and means for reducing probability<sup>2</sup> are discussed in the current report, which uses a Swedish study from 2016 as the main reference [2].

### **Consequences of an explosion in gas vehicles in a tunnel or car park**

Tunnel constructions in Norway are robust and equipped with fans that may contribute to dilute a possible gas cloud. However, all electrical equipment may be potential ignition sources, unless they are approved for explosive environments. The pressure wave from a gas explosion is not expected to damage the integrity of the tunnel, but may cause human injuries and damages on cars and tunnel equipment. Present regulations are considered to be well adapted to the risks that gas vehicles constitute with regard to the tunnel construction. However, it is important that the risk assessment are validated and relevant for the actual conditions.

Car parks have in general few pressure relief surfaces and, compared to a tunnel, the construction may be more vulnerable to a gas explosion. The ventilation fans installed in car parks have smaller capacity than the ones installed in tunnels, and may therefore be less efficient in diluting a gas cloud to a non-combustible mixture. In Norway, the regulations are non-fuel specific and do not describe how parking of gas vehicles should be handled.

### **Assessment of probability reducing initiative**

The Swedish report [2] proposes three main measures to reduce the likelihood of a gas tank explosion in case of a fire. Here, the three initiatives are assessed with regard to Norwegian conditions:

- *Improved test standard and more robust tanks.* The fire test scenario for CNG-tanks is incompletely described and not representative for a real fire. Although the pressure relief devices in general function as intended, a number of incidents over the past years have indicated that CNG-tanks may explode when exposed to a fire. The fire test standard for hydrogen tanks gives a more realistic test scenario. In addition, as far as we know, there have been no incidents where a vehicle hydrogen tank has exploded in a fire. It is not known if the lack of reported incidents is due to a more relevant fire test standard, or the fact that there are still few hydrogen vehicles on the roads. The effect of further improving the test standard for hydrogen tanks is therefore uncertain.

---

<sup>2</sup> A cost-benefit analysis is not conducted in this study. This must be performed in further assessments.

- *Installation of an automatic extinguishing system in public car parks* will contribute positively with regard to fire spread, independently of the fuel. Since CNG-tanks in some cases have exploded in a fire, an automatic extinguishing system may be a measure to reduce the explosion risk. The automatic extinguishing system will cool down and reduce the fire spread to a gas vehicle from a neighboring vehicle. Due to lack of statistics for hydrogen vehicle fires, we do not have the basis to assess whether an automatic extinguishing system will be an effective mean for reducing the probability of an explosion to occur in a hydrogen vehicle. However, an automatic extinguishing system will in any case reduce the probability for a car fire to spread to a hydrogen vehicle.
- *More frequent periodic control of vehicles.* In Sweden there have been accidents with CNG-tanks that could have been prevented by a periodic control of the vehicle. It is therefore important to have good procedures to ensure that all gas vehicles are periodically controlled.

#### **Further work**

To assess the need for extra safety measures for gas vehicles in car parks, it is necessary to study possible consequences of a hydrogen tank explosion and a hydrogen cloud explosion in typical Norwegian car parks.



## Ordforklaringer

<b>CBG</b>	<i>Compressed bio gas</i> er komprimert biogass.
<b>CNG</b>	<i>Compressed natural gas</i> er komprimert metangass.
<b>Deflagrasjon</b>	En deflagrasjon kjennetegnes av en flammefront som beveger seg subsonisk, dvs. med en hastighet opp til lydhastigheten (340 m/s). Overtrykk fra en deflagrasjon når sjelden høyere enn 0,5 bar, men kan under optimale betingelser i innelukkede rom oppnå rundt 8 bar.
<b>Detonasjon</b>	En detonasjon er en flammefront som beveger seg i supersonisk hastighet, dvs. med en hastighet raskere enn lydhastigheten. En detonasjon fører til kraftige trykkbølger opp til 20 bar.
<b>Gasskyeksplosjon</b>	Dersom en lekkasje oppstår fra gasstank, vil gassen blande seg med luft. Dersom blandingsforholdet mellom luft og brennbar gass er riktig, og en tennkilde er i nærheten, vil gasskyen eksplodere.
<b>Gasstankeksplasjon</b>	Hvis en gasstank blir oppvarmet, vil trykket i gassen øke. I sjeldne tilfeller skjer det at trykkavlastningsventilen ikke løser ut når den skal, og da vil trykket kunne bygge seg opp til tanken eksploderer.
<b>HIAD</b>	<i>Hydrogen Incident and Accident Database</i> er en database som registrerer uønskede hendelser og ulykker tilknyttet hydrogenvirksomhet.
<b>LPG</b>	<i>Liquefied propane gas</i> er propangass nedkjølt til flytende form.
<b>Trykkavlastningsventil</b>	Gasstanker har en trykkavlastningsventil med en smeltesikring som smelter ved en bestemt temperatur. Dersom tanken blir oppvarmet skal denne løse ut slik at trykket ikke overstiger hva tanken tåler.
<b>UNECE</b>	United Nations Economic Commission for Europe

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Det er en økende andel kjøretøy med alternative energibærere på norske veier. Kjøretøy med el og gass som drivstoff har andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn kjøretøy med konvensjonelt, fossilt brensel, og fører til nye problemstillinger med hensyn til brann sikkerhet på veier, i tunneler og i parkeringskjellere. Hvis ikke forsknings- og kunnskapsnivået følger den raske innfasingen av alternative energibærere i transportsektoren, oppstår det usikkerhet med hensyn til brann sikkerheten. Det må derfor gjøres en kontinuerlig vurdering av om gjeldende praksis og regelverk er relevant for forebygging av brannrelaterte hendelser som involverer alternative energibærere i kjøretøy. Dette er også nødvendig for at brann- og redningsmannskap skal kunne håndtere ulykker på en sikker måte.

Bilparken i Norge og Sverige har en rekke forskjeller. I utgangen av 2016 hadde Norge et stort antall elkjøretøy (~100 000), få gasspersonbiler og en økende andel gassbusser [1]. I Sverige er det motsatt, det vil si en relativt liten andel elbiler, men en større andel gasskjøretøy enn i Norge. Totalt var det ca. 50 000 registrerte gasskjøretøy i Sverige i 2015, hvorav mer enn 90 % var personbiler og mindre varebiler [4]. Ved utgangen av 2015 var det 626 registrerte gassbusser i Norge, og 562 gassdrevne personbiler, varebiler og lastebiler [5]. Ettersom Norge i Nasjonal transportplan har utarbeidet ambisiøse mål om at nye biler fra 2025 skal være nullutslippsbiler [6], er det forventet at andelen gasskjøretøy vil øke i årene som kommer. I Sverige er de fleste gasskjøretøy drevet av CNG (compressed natural gas) eller CBG (compressed bio gas). I Norge finnes det en betydelig andel CNG-busser. Det er et fåtall LPG-biler i Norge i dag, og det er ikke forventet at andelen kommer til å øke spesielt i årene framover. Til tross for at det foreløpig er svært få hydrogendrevne kjøretøy på norske veier, er antallet forventet å øke i årene som kommer.

Det er utført litteraturstudier for å vurdere relevansen av norsk regelverk med hensyn til sikkerhet ved el- og gasskjøretøy i innelukkede rom. I en rapport utgitt av SP Fire Research i 2015, ble det blant annet konkludert med at det var et behov for mer kunnskap om forebygging av, og mulige konsekvenser ved, brann eller eksplosjon i gasskjøretøy i innelukkede rom [1]. En brann i en innelukket rom vil ofte utvikle seg annerledes enn en brann i friluft. Det er eksempelvis mindre sannsynlig at gass fra et gassutslipp i friluft samler seg opp og danner en eksplosiv konsentrasjon, enn ved et gassutslipp i et innelukket rom. Det er derfor kritisk at sikkerhetsmekanismene til gasstanker i kjøretøy fungerer. Det har vært flere ulykker der sikkerhetsmekanismer ikke har fungert, og det er manglende kunnskap om hvordan aldring, slitasje og skader påvirker sikkerhetsmekanismer og lekkasje fra tank. Det er også nødvendig å gjennomgå om bygningskonstruksjoner der det kan skje eksplosjon er tilstrekkelig robuste.

I denne rapporten ser vi videre på brann- og eksplosjonssikkerhet ved gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere, med fokus på kjøretøy med CNG eller hydrogen. Rapporten er bygd opp som følger: Først oppsummeres regelverk som er relevant for prosjektering og drift av tunneler og parkeringskjellere og testing av gasstanker. Deretter beskrives hvordan eksplosjonsrisiko for bygningskonstruksjoner og gass-tanker vurderes i bakgrunns litteraturen. Basert på denne informasjonen diskuteres det norske regelverkets relevans og eventuelle risikoreduserende tiltak.

## 1.2 Målsetting

Prosjektet har hatt som målsetting å bidra til å tette huller i kunnskapen om brannsikker bruk og parkering av gassdrevne kjøretøy, og bidra til nordisk utveksling av kunnskap om gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom. Det siste er ivarettatt ved tett dialog med RISE (Research Institutes of Sweden)<sup>3</sup>, som i 2016 gjennomførte en litteraturstudie for Nordisk Vegforum (NVF) på temaet alternative energikilder i tunneler og parkeringskjellere.

## 1.3 Metoder

Informasjon er innhentet ved:

- Søk i litteratur og nyhetsartikler
- Gjennomgang av regelverk
- Dialog og workshop med RISE i Sverige for utveksling av kunnskap

## 1.4 Avgrensninger

Denne rapporten har kun tatt for seg innelukkede rom i form av tunnel og parkeringskjellere. Noe av informasjonen kan være overførbart til andre typer innelukkede rom, som for eksempel ferger, men dette er ikke undersøkt.

Med parkeringskjellere menes innelukkede parkeringsgarasjer over eller under bakken.

Vi har valgt å fokusere på hydrogen- og CNG-kjøretøy på grunn av følgende:

- Til tross for at det i dag er svært få hydrogendrevne kjøretøy i Norge, er antallet hydrogendrevne kjøretøy og transport av hydrogen forventet å øke i årene som kommer.
- Det finnes en betydelig andel CNG-busser i Norge i dag.
- Det finnes et fåtall LPG-biler i Norge i dag, og det er ikke forventet at antallet kommer til å øke spesielt i årene framover. LPG-drevne kjøretøy er derfor ikke inkludert i denne rapporten.

Det er ikke undersøkt i hvilken grad regelverket blir fulgt for tunneler og parkeringskjellere.

Vi har brukt litteraturstudien fra Sverige som underlagslitteratur, men vi har ikke vurdert bygningstekniske forskjeller mellom parkeringskjellere i Norge og Sverige.

Det er ikke utført kost-nytte analyse av tiltakene som diskuteres i denne rapporten.

---

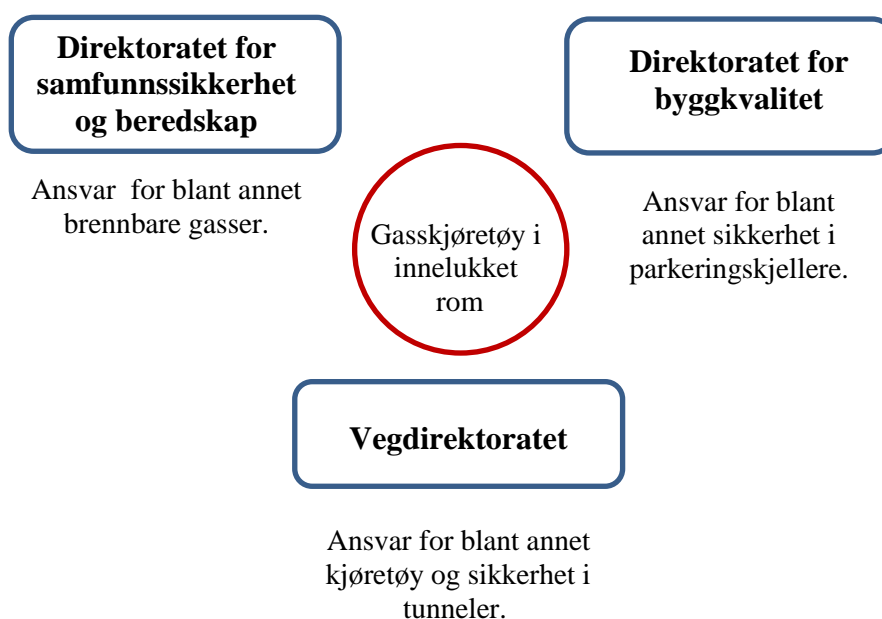
<sup>3</sup> Tidligere: SP Technical Research Institute of Sweden

## 2 Regelverk

### 2.1 Ansvarsfordeling

Ansvarsfordelingen når det gjelder gasskjøretøy i innelukket rom er skissert i Figur 2-1. Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) forvalter det byggtekniske regelverket. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) har ansvar for blant annet sikker håndtering og oppbevaring av brannfarlig gass. Vegdirektoratet har ansvar for bygging og vedlikehold av riks- og fylkesveier og tilsyn med kjøretøy.

Vegdirektoratet vil dermed alltid ha ansvar for et gasskjøretøy siden det er et kjøretøy, DSB vil alltid ha ansvar fordi kjøretøyet er bærer av brennbar gass, mens DiBK vil ha ansvar når kjøretøyet parkeres i en parkeringskjeller.



**Figur 2-1** Ansvaret for brann- og eksplosjonssikkerheten til gasskjøretøy i tunnel og parkeringskjeller fordeles på tre ulike direktorater.

### 2.2 Gasskjøretøy generelt

Den brennbare gassen i gasskjøretøy faller inn under definisjonen farlig stoff etter brann- og eksplosjonsvernloven (§ 4) [7]. I tillegg reguleres kjøretøy etter kjøretøyforskriften [8].

Kjøretøyforskriften stiller krav for LPG-, CNG- og ombygde kjøretøy i § 22, men har foreløpig ingen spesifikasjoner for hydrogenkjøretøy.

## 2.3 Tunnel

Tunnelkonstruksjoner i Norge er robuste, og en rekke forskrifter og veiledninger stiller krav til hvordan de skal utformes med hensyn til rømningsveier, sikkerhet mot brann, brannvesenets oppgaver og ventilasjon.

I forskriftene står det ikke spesifikt hvordan tunneler skal bygges og driftes for å kunne håndtere eksplosjoner, men under flere avsnitt er det konkret nevnt problemstillinger som må vurderes. Disse er relevante med hensyn til risikoen ved gasskjøretøy. I vedlegg I til Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften) [9] finnes følgende krav:

### **2.7 Konstruksjonenes brannmotstand**

*Hovedkonstruksjonen i alle tunneler der et lokalt sammenbrudd i konstruksjonen kan ha katastrofale konsekvenser (f.eks. oversvømte tunneler eller tunneler som kan føre til sammenbrudd i viktige nabokonstruksjoner) skal ha et tilstrekkelig brannmotstandsnivå.*

### **2.9.1 Ventilasjon**

*Konstruksjon, bygging og drift av ventilasjonssystemet skal ta hensyn til:*

- kontroll med varme og røyk i tilfelle brann.

### **3.7 Transport av farlig gods**

*Følgende tiltak skal anvendes når det gjelder adgang til tunneler for kjøretøyer som transporterer farlig gods, slik dette er definert i relevant europeisk lovgivning om transport av farlig gods på veg:*

- utføre en risikoanalyse i henhold til § 10 før regler og krav til transport av farlig gods gjennom en tunnel fastsettes eller endres.

I vedlegg II står følgende:

### **4.1 Endringer**

*Ved enhver vesentlig endring i konstruksjon, utrustning eller bruk som på en betydelig måte vil kunne endre bestanddeler av sikkerhetsdokumentasjonen, skal tunnelforvalter søke om ny brukstillatelse i samsvar med framgangsmåten beskrevet i nr. 3.*

### **5. Jevnlige øvelser**

*Tunnelforvalter og redningstjenestene skal, i samarbeid med sikkerhetskontrolløren, jevnlig arrangere felles øvelser for tunnelpersonalet og redningstjenestene.*

Tabell 9.3 i Håndbok N-500 [10] opplyser dimensjoneringskrav for brannventilasjon i norske tunneler, og er delvis gjengitt i Tabell 2-1.

**Tabell 2-1 Dimensjoneringskrav for brannventilasjon for tunneler med stigning  $\leq 2\%$**

Tunnelklasse	Tunnellengde	Dimensjonerende branneffekt	Minimum lufthastighet
<b>A</b>	> 1,0 km	50 MW	3,0 m/s
<b>B</b>	> 1,0 km	50 MW	3,0 m/s
<b>C</b>	> 1,0 km	50 MW	3,0 m/s
<b>D</b>	< 2,0 km	50 MW	3,0 m/s
	> 2,0 km	100 MW	4,5 m/s
<b>E</b>	> 1,0 km	50 MW	3,0 m/s
<b>F</b>	< 2,0 km	50 MW	3,0 m/s
	> 2,0 km	100 MW	4,5 m/s

Oppsummert skal alle tunneler der lokale sammenbrudd er kritiske være spesielt forsterket. Ventilasjonssystemet skal være tilpasset brannrisikoen, og i de fleste tilfeller betyr det en ventilasjonshastighet på minimum 3 m/s. Det skal være utført en risikoanalyse for transport av farlig gods. Ved enhver bruksendring som har betydning for sikkerhetsdokumentasjonen skal tunnelforvalter søke om ny brukstillatelse, og det skal avholdes realistiske øvelser med jevne mellomrom i alle tunneler.

## 2.4 Parkeringskjeller

I Norge skiller ikke gjeldende regelverk for parkeringsbygg mellom kjøretøy med ulike drivstofftyper, og det er noe uklart hvordan gasskjøretøy skal behandles. Imidlertid beskriver regelverket hvilke mengder brannfarlig væske og gass privatpersoner har lov til å oppbevare, og på hvilken måte stoffene skal oppbevares [11]<sup>4</sup>.

Fra Forskrift om håndtering av farlig stoff, § 5 [11]:

**§ 5. Krav til aktsomhet**

*Brannfarlig gass kategori 1 og 2 skal ikke oppbevares i kjeller eller annet rom under terreng eller på loft.*

Følgende er hentet fra § 11-5 Sikkerhet ved eksplosjon i byggeteknisk forskrift (TEK 10) [12], og er relevant for bygninger der det oppbevares stoffer som medfører en risiko for eksplosjon:

**§ 11-5. Sikkerhet ved eksplosjon**

*Byggverk der forutsatt bruk kan medføre fare for eksplosjon, skal prosjekteres og utføres med avlastningsflater slik at personsikkerhet og bæreevne opprettholdes på et tilfredsstillende nivå.*

<sup>4</sup> Teksten i dette avsnittet er direkte gjengitt fra *Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom* [1].

Til tross for at forskriften ovenfor ikke tillater oppbevaring av brannfarlig gass, gjelder ikke dette gass i form av drivstoff på en tank i et kjøretøy.

Følgende preaksepterte ytelser gjelder:

- Rom hvor det kan forekomme fare for eksplosjon må utgjøre egen branncelle.
- Rom hvor det kan forekomme fare for eksplosjon må ha minst én trykkavlastningsflate når ikke andre tiltak er truffet, for å sikre mot skader på personer og byggverket for øvrig.
- Bærende og branncellebegrensende bygningsdeler må om nødvendig forsterkes for å opprettholde rømningsveiers funksjon og forhindre spredning av brann til andre brannceller.

I de preaksepterte ytelsene spesifiseres det at det skal være minst én trykkavlastningsflate, men det er eksempelvis ikke videre beskrevet hvor stort areal denne skal ha i forhold til branncellens volum og øvrige geometri, og hva slags materiale flaten skal bestå av. I litteraturen foreslås trykkavlastende vegger som er lettere enn  $10 \text{ kg/m}^2$  [13].

Funksjonen til normalventilasjon (klima- og eksosventilasjon) er å sørge for godt innklima, og er ikke tilstrekkelig til å ventilere ut røyk ved brann. I små, private garasjer er det ikke krav om normalventilasjon. For større garasjer oppgir Byggteknisk forskrift med veiledning (VTEK 10), § 13-3 følgende krav [14]:

- Garasje for langtidsparkering:  $3 \text{ m}^3/\text{time}$  per  $\text{m}^2$  bruttoareal.
- Garasje for korttidsparkering:  $6 \text{ m}^3/\text{time}$  per  $\text{m}^2$  bruttoareal.

Dersom garasjen har en takhøyde på 2,4 m, tilsvarer dette henholdsvis 1,25 og 2,5 luftutskiftninger per time.

I VTEK 10 [14] stilles det ekstra krav til røykventilasjon i parkeringskjellere over en viss størrelse, for å tilrettelegge for eventuell slukke- og redningsinnsats. § 11-17 *Tilrettelegging for rednings- og slukkemannskap* oppgir blant annet følgende preaksepterte ytelser for parkeringskjellere:

- I parkeringskjellere som har bruttoareal mindre enn  $400 \text{ m}^2$  eller automatisk slukkeanlegg, er det tilstrekkelig med normalventilasjon.
- Parkeringskjellere uten automatisk slukkeanlegg og med bruttoareal større enn  $400 \text{ m}^2$  må ha røykventilasjon.
- Mekanisk røykventilasjon må ha ventilasjonsretning vekk fra inn- og utkjøringsrampe til parkeringskjelleren, og til røykutkast i motsatt ende av rommet.
- Røykventilasjon må dimensjoneres slik at det, i alle deler av rommet, oppnås en lufthastighet som hindrer tilbakestrømming av brannrøyk, normalt minst  $1 \text{ m/s}$ .
- Antall og plassering av brannvesenets angrepsveier til en parkeringskjeller må være slik at alle deler av parkeringskjelleren kan nås med maksimalt  $50 \text{ m}$  slangeutlegg fra angrepsvei.
- Ventilasjon bør kunne aktiveres av detektorer for å hindre at eksplosive forhold oppstår.
- Store parkeringskjellere med mange angrepsveier bør ha strobelys som viser nærmeste angrepsvei på røykfri side.

## 2.5 Trykkavlastningsventiler for gasskjøretøy

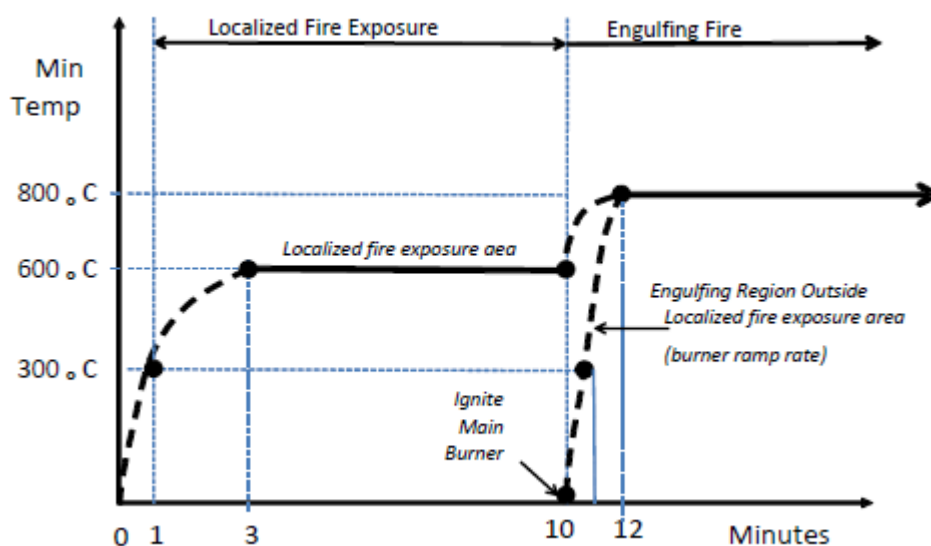
I forbindelse med brann er trykkavlastningsventilen den viktigste sikkerhetsmekanismen til gasstanker for bruk i kjøretøy. Denne har som funksjon å løse ut ved en bestemt temperatur for å unngå at det bygger seg opp et høyere trykk enn det beholderen er designet for.

### Standard for trykkavlastningsventiler på CNG-tanker

CNG-tanker må gjennomgå en rekke tester gjennom UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) R. 110 [15]. Her stilles det krav om at trykkavlastningsventilen skal løse ut på 110 °C. Det er også krav om at beholderen skal bestå en branntest. I branntesten er det imidlertid ikke spesifisert hva slags brensel som skal benyttes, kun at det skal være en uniform brannkilde med 1,65 m lengde som skal gi direkte flammer på gassbeholderens overflate. Minst ett termoelement skal registrere minimum 590 °C innen 5 minutter etter teststart og forbli på minimum dette nivået til trykkavlastningsventilen løser ut. Denne beskrivelsen gir grunnlag for mange ulike testscenarier, og er nødvendigvis ikke representativ for de brannscenarier som kan oppstå i virkeligheten.

### Standard for trykkavlastningsventiler på hydrogentanker

Det finnes også en standard for test av gasstankene til hydrogenkjøretøy (UNECE R. 134) [16]. Denne teststandarden bygger på UNECE R. 110, men er noe mer beskrivende med hensyn til temperaturforløpet, som er vist i Figur 2-2. Her skal en del av tanken varmes opp til 600 °C i løpet av 3 minutter ved hjelp av en propanbrenner. Temperaturen skal så holdes konstant i ytterligere 7 minutter. Deretter skal en ny propanbrenner antennes slik at flammen treffer hele tanken og temperaturen på flammen skal øke til 800 °C i løpet av 2 minutter. Tanken skal utsettes for denne påkjenningen til trykkavlastningsventilen løser ut.



**Figur 2-2** Temperaturforløpet en hydrogentank skal utsettes for i den standardiserte branntesten.  
Figuren er hentet fra UNECE R. 134 [16].



I Europa er det felles regler for typegodkjenning av hydrogenkjøretøy. Disse finnes i Europaparlamentets forordning i direktiv 2007/46/EG. Videre finnes det en regulering av hvordan sikkerhetskomponenter skal fungere, testes og installeres, som beskrevet i UNECE R.134 og GTR 13 ECE [17].

## 2.6 Retningslinjer for redningspersonell

I Sverige anbefaler Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) en varm sone på 10 m rundt et gasskjøretøy som er innblandet i en ulykke, og 50 m dersom gasskjøretøyet har begynt å brenne og trykkavlastningsventilen ikke er utløst [4]. I varm sone skal det benyttes brannvernbekledning, trykkluftsapparat og gassmåler. Ex-klassifisert kommunikasjon og belysning må benyttes. Ved brann i kupéen til kjøretøyet skal i tillegg hørselsvern og ekstra beskyttelsesvisir benyttes.

I tilfeller der trykkavlastningsventilen løser ut for et hydrogenkjøretøy ved brann, anbefales det i en studie fra 2015, at redningspersonell må ha brannvernbekledning innenfor en radius på 12 m for å beskytte seg mot flammeballen som vil oppstå når trykkavlastningsventilen utløser [18].

## 3 Eksplosjonsrisiko i tunnel og parkeringskjeller

### 3.1 Eksplosjon

Det skilles mellom to typer eksplosjoner som kan oppstå i forbindelse med gasskjøretøy.

- *Gasskyeksplosjon*: Dersom en lekkasje oppstår fra tanken, vil gass kunne akkumulere, blande seg med luft og antenne.
- *Gasstankeeksplosjon*: Dersom en gassbeholder blir utsatt for en varmpåkjønning, vil gasstrykket øke. Trykket vil øke til enten en trykkavlastningsventil slipper ut gassen, eller til beholderen ikke klarer å motstå trykket og revner.

Når vi snakker om eksplosjoner skilles det mellom *deflagrasjon* og *detonasjon*, der detonasjon er den kraftigste. Mer informasjon om eksplosjoner finnes vedlegg B.

### 3.2 Vegtunneler

En eksplosjon inne i en tunnel vil bli kraftigere enn en tilsvarende eksplosjon utendørs. Småskalatester har vist at en gassky kan gi opptil 15 ganger høyere overtrykk i en tunnel, enn om samme mengde gassky hadde blitt antent i friluft [19].

Fysiske hindre i tunnelen, slik som biler, lysarmaturer og vifter, har vist seg å øke trykkbølgens hastighet og sannsynligheten for en overgang fra deflagrasjon til detonasjon [20]. Dette stemmer med teori, som beskriver at en flammefront akselerer ved turbulens. For at detonasjon skal oppstå er det nødvendig at flammefronten kan bevege seg i en lang avstand i forhold til diameteren. Med andre ord er gasslekkasjer mer kritiske i lange tunneler enn korte. Det er vist at hindrene påvirker trykket og flammehastigheten i stor grad for hydrogen, men i liten grad for CNG [13]. Disse funnene underbygges av en annen studie [21], der overtrykk for ulike utslipp av CNG og hydrogen i en tunnel ble beregnet. Det maksimale overtrykket ved et 1000 m<sup>3</sup> (67 kg i støkiometrisk blanding) CNG-utslipp ga i en konservativ beregning 0,6 bar, mens en 1000 m<sup>3</sup> (24 kg i støkiometrisk blanding) luft-hydrogen-blanding ga 12 bar overtrykk. Ved å redusere gasskyen fra 1000 m<sup>3</sup> til 250 m<sup>3</sup> (støkiometrisk blanding) ble det maksimale overtrykket redusert til 0,05 bar for CNG og 2,1 bar for hydrogen. For mindre gasskyer (5 m<sup>3</sup>– 125 m<sup>3</sup>) lå overtrykkene fra 0,01 bar til 0,74 bar. Konklusjonen fra simuleringene viser likevel at forventede overtrykk ligger mellom 0,1 til 0,3 bar.

Ifølge Ingason m.fl. er en ventilasjon på 3 m/s vurdert til å være tilstrekkelig for å føre all gass ut av en tunnel med ventilasjonsretningen innen tilstrekkelig tid [22]. Simuleringer av store utslipp og gasseksplosjoner har imidlertid vist at 3 m/s ikke er nok til å fortynne en gassky innenfor en kort tidsramme [21].

### 3.3 Parkeringskjellere

Også i parkeringskjellere vil en eksplosjon gi forhøyet overtrykk på grunn av hindre og vegger som reflekterer trykkbølgene. Parkeringskjellere har få avlastningsflater som kan absorbere noe av trykket. For at en bygning skal unngå å kollapse som følge av en intern eksplosjon, er det viktig at bygget har en sterk rammestruktur som holder på plass taket.

Når en trykkbølge treffer en bygning rett forfra, vil trykket mot veggen stoppes og reflekteres, og dermed gi både statisk og dynamisk påvirkning. Denne effekten gjør at det reelle trykket øker med en faktor 2 for lave trykk, og opp mot en faktor 20 for høyere trykk [2].

I innelukkede rom kan sekundære trykkbølger som reflekteres fra vegger være like store som den primære trykkbølgen. Dette kan føre til store skader, for eksempel ved at den primære trykkbølgen løfter taket noe, slik at bærebjelker mister lasten sin. Den sekundære trykkbølgen kan da slå bort bærebjelken som ikke har noen last. Armerte betongsøyler er vanskeligere å flytte på, jo høyere last de har. Dermed er de sårbare for sekundære trykkrefter i kombinasjon med oppadrettet trykk som reduserer lasten på dem [2].

Prosjektet HySafe anbefaler at ventilasjonen skal ha 20 – 25 luftutsiftninger per time for å redusere mengden brennbar gass som kan akkumuleres [23]. Ved CFD-beregninger er det imidlertid blitt vurdert at 100 luftutsiftninger per time er nødvendig for å fortynne et stort gassutslipp [24].

En rekke hendelser viser alvorligheten av gasseksplosjoner i innelukkede rom, og det er viktig å gjøre både sannsynlighets- og konsekvensreduserende tiltak for å redusere risikoen for eksplosjoner. Hendelser har vist at gasstanker kan eksplodere dersom de blir utsatt for en kraftig brann [25]. En måte å redusere sannsynligheten for en gasstank-eksplosjon er derfor å redusere sannsynligheten for at en brann som oppstår i en parkeringskjeller sprer seg til gasskjøretøy som befinner seg i nærheten. Statistikk fra to ulike rapporter viste at andelen branner som spredte seg i parkeringskjellere varierte mellom 3 – 15 %, og kun 2 % av brannene spredte seg til flere enn fire biler [26] [27]. En studie viste at en brann i et garasjeanlegg kan spre seg til neste bil selv om det er en tom parkeringsplass mellom bilene [28]. I løpet av de siste 12 årene har det vært en rekke store branner i parkeringskjellere. Mer informasjon finnes i vedlegg A.

### 3.4 Ikke-fungerende trykkavlastningsventiler

En gassbeholder som utsettes for brann vil raskt miste sin mekaniske styrke [4]. Gasstanken kan eksplodere hvis trykkavlastningsventilens kapasitet ikke er tilstrekkelig i forhold til mengden gass som skal ventileres ut. En tank må normalt utsettes for en brann i 10 – 20 minutter for at dette skal skje [29]. En 120 liters CNG-tank med et trykk på 200 bar kan teoretisk frigjøre energi tilsvarende 1,85 kg TNT. Dette tilsvarer ødelagte vinduer innenfor en radius på 30 m og dødelighet for mennesker innenfor en radius på 12 m [29].

I en testserie ble to hydrogengasstanker med blokkerte trykkavlastningsventiler utsatt for varme fra en propanbrenner. Disse gikk i luften etter 6 – 12 minutter, og en flammeball på 7 – 24 m ble dannet. Deler av tanken ble slynget 82 m bort fra stedet der eksplosjonen oppsto [30]. Energien fra eksplosjonen ble beregnet av to ulike grupper til å være mellom 6 og 15 MJ [31]. En konklusjon fra testen var at sikkerhetsavstanden når en gasstank er i fare for å eksplodere bør være 100 m.

En amerikansk studie undersøkte 138 hendelser med CNG-kjøretøy i perioden 1976 til 2010 [25]. Av disse resulterte 50 hendelser i at gasstanken eksploderte, og minst 14 av disse skyldtes at trykkavlastningsventilen ikke løste ut. De øvrige av de 50 hendelsene skyldtes i stor grad skade på tanken eller ukjent årsak. Av det totale antall hendelser der det oppsto brann, feilet trykkavlastningsventilen for én eller flere tanker i 35 % av tilfellene.

Typiske feilmekanismer for gasstanker med smeltesikring er:

- Lokal oppvarming av tanken har ført til at tanken har eksplodert. I flere bussulykker har den lokale oppvarmingen skjedd fra undersiden av tankene, der flammer har kommet ut fra en takluke eller annen åpning, og varmet tankene i senter uten at trykkavlastningsventilene har blitt varmet opp tilsvarende [29].
- Ved avkjøling av tankene med vann har det skjedd at også trykkavlastningsventilen har blitt nedkjølt, med den følge at den ikke har utløst når den skulle, og tanken har eksplodert. Det mistenkes at dette var årsaken til at fem gasstanker med CNG eksploderte ved brann i en søppelbil i 2015 [32].
- Tanken kan ha fått en mekanisk skade som svekker konstruksjonen, slik at den ikke tåler økt trykk i samme grad som en ny tank.

Hydrogengasstanker er utsatt for de samme feilmekanismene som CNG-tanker, men hittil er ingen alvorlige ulykker der gasstanken har eksplodert som følge av en brann registrert i HIAD<sup>5</sup>-databasen [33].

Flere hendelser er beskrevet i rapporten *Gasdrivna fordon – händelser och standarder* utgitt av MSB [4].

---

<sup>5</sup> En database som registrerer uønskede hendelser og ulykker tilknyttet hydrogenvirksomhet.

## 3.5 Redningsinnsatser i innelukkede rom

En redningsinnsats under bakken, som i en tunnel eller parkeringskjeller, er mer krevende enn i bygninger over bakken. Dette avsnittet beskriver noen av utfordringene.

### Uoversiktlig situasjon

Et av de store problemene med branner i innelukkede rom er at det er utfordrende å få oversikt over hva som brenner, hvor det brenner, og hvor mange personer som ikke er gjort rede for. Anleggene kan være store og uoversiktlige, og er ofte ukjente for brannvesenet. For å få full oversikt over situasjonen må redningsmannskaper ofte komme helt inn til brannen. På grunn av den uoversiktlige situasjonen kan det også være utfordrende å velge hvilken angrepsvei som er den mest hensiktsmessige.

### Lange innsatsveier

Underjordiske anlegg har ofte lange innsatsveier. Hovedutfordringen med dette er at å koble sammen slanger tar lang tid. I tilfeller der angrepsveien er mer enn 100 m, tar dette så lang tid at innsatsen i praksis blir umulig å gjennomføre. Ved å finne mer effektive metoder både for slangekobling, transport av slanger (f.eks. ved bæreseler), og mer effektiv forflytning, vil innsatsen bli betydelig mer effektiv. Det påpekes imidlertid at realistiske øvelser er helt nødvendig for å kunne gjennomføre dette [34]. Den lange innsatsveien kombinert med hardt arbeid og varm omgivelsesluft gjør at brannmannskaper er utsatt for å få forhøyet kroppstemperatur. Ved slike innsatser er det viktig å ha flere røykdykkerpar som kan avløse hverandre. I tilfeller der det ikke er fare for overtenning eller å bli overrasket av brann, kan en rekognoseringsstyrke gå ned som første innsats. Denne styrken beveger seg lett uten tunge slanger, og har som formål å skaffe oversikt over situasjonen og bistå i evakuering. Rekognoseringsstyrken kan med fordel ta med seg en lysline slik at det er lett å finne veien tilbake, både for dem selv og for personer som skal evakuere. Luftforbruket er en kritisk faktor, og alternative gjenluftsapparater bør vurderes istedenfor komprimert luft.

### Røyk og ventilasjon

Et røykfyllt miljø er svært utfordrende å jobbe i, og helsefarlig å evakuere gjennom. Dersom tett røyk har rukket å spre seg mer enn 200 m langs innsatsveien når redningsmannskapene begynner sin innsats, er mulighetene for å rekke fram til brannen før den har spredt seg i praksis umulig dersom dagens utrustning og metoder legges til grunn [35]. Det er viktig å forstå hvordan ventilasjonen påvirker forholdene nedstrøms av brannen, og hvilke konsekvenser dette kan få for personer som befinner seg i den delen av bygningen. På den ene siden vil ventilasjon bidra til å skape et røykfritt miljø oppstrøms av brannen, men kan på den annen side både intensivere brannen og forverre røykforholdene for personer som befinner seg nedstrøms. I et garasjeanlegg er sjelden ventilasjonsanlegget kraftig nok til å ventilere ut røyken. Her er det behov for ekstra viftekapasitet fra brannvesenet. Det er viktig at ikke røyken sendes inn i trapperom og andre deler av bygget når utlufting skjer. Store vifter kan imidlertid gjøre kommunikasjonen mellom røykdykkere og innsatsledere mer utfordrende.

### **Innsats når gasskjøretøy er involvert**

Et problem med gasstanker og brann er at redningspersoner ofte ikke våger å gjøre en offensiv innsats. Det velges ofte en mer defensiv taktikk, der området sperres av og brannen får brenne ut. Dette kan bli utfordrende i et garasjeanlegg, der ikke å gripe inn i situasjonen kan gjøre at brannen eskalerer og i ytterste konsekvens påvirker andre deler av bygget eller bygg i nærheten.

## **3.6 Risikoreduserende tiltak**

I rapporten fra den svenske studien [2] diskuteres følgende tiltak for å redusere risikoen for gassseksplasjon i parkeringskjellere:

- Store romvolum minsker sannsynligheten for gassakkumulering, og vil være positivt med tanke på trykkavlastning. For brannsikkerheten er store romvolum derimot uheldig, siden hver branncelle blir større.
- Det kan være hensiktsmessig i større grad å benytte trykkavlastende vegger og vinduer som er lettere enn  $10 \text{ kg/m}^2$ . Tyngre vegger vil ikke reagere raskt nok på en trykkbølge, og vil derfor ikke ha tilstrekkelig trykkavlastende effekt [13].
- Armert betong har best integritet mot en eksplosjon, mens mur og pre-fabrikkerte løsninger gir dårligst beskyttelse. Bærende vegger og stolper må være godt forankret i tak for å kunne motstå den sekundære trykkbølgen som dannes.
- Større avstand mellom biler reduserer sannsynligheten for brannspredning.
- Montering av et sprinkleranlegg vil bidra til å hindre brannspredning.
- Kameraovervåking vil bidra til å redusere antall påsatte branner.
- Gasskjøretøy på bestemte plasser vil gjøre forholdene for innsatsstyrker mer forutsigbare.
- Krav til bedre brannmotstand og en bedre teststandard for gasstanker vil gjøre tankene mer robuste mot brann og redusere sannsynligheten for en gasstankeeksplosjon.
- Krav om periodiske kontroller av gasstanker bør følges opp bedre.
- Ventilasjon bør kobles til deteksjon av gass.

## 4 Diskusjon

### 4.1 Tunneler

#### Regelverk

Generelt er dagens regelverk for tunneler godt tilpasset den risikoen som gasskjøretøy utgjør med hensyn til brann- og eksplosjonssikkerhet. Ordlyden i forskriftene kan imidlertid bli noe tydeligere i forhold til hvordan sikkerheten skal ivaretas med hensyn til gasskjøretøy, og flere preaksepterte løsninger for gasskjøretøy kan med fordel legges til veiledningene.

I dag praktiseres allerede frakt av farlige gasser gjennom tunneler. Risikoen for en gasseksplosjon skal derfor allerede være vurdert for de aller fleste tunneler gjennom oppfyllelse av § 3.7 i tunnelsikkerhetsforskriften. Alle vesentlige bruksendringer som på en betydelig måte vil kunne endre deler av sikkerhetsdokumentasjonen må risikovurderes på nytt. Dette er et viktig krav, som innebærer at tunneler med jevne mellomrom vil bli vurdert mot gjeldende brannrisiko fra kjøretøyene som benytter dem.

Det er imidlertid viktig at personer som utfører risikovurderinger knyttet til hydrogenkjøretøy har tilstrekkelig kunnskap, og at det benyttes risikomodeller som er validert og relevant for de faktiske forhold.

Det står videre i tunnelsikkerhetsforskriften at sårbare punkter i en tunnel med hensyn til konstruksjonen skal ha tilstrekkelig brannmotstandsnivå. Det er usikkert om tilstrekkelig brannmotstandsnivå samsvarer med tilstrekkelig eksplosjonsbeskyttelse.

Et annet viktig punkt er kravet om jevnlig øvelser. En studie påpeker at en av de viktigste tiltakene et brannvesen kan gjøre for å være bedre rustet mot en tunnelbrann er å gjennomføre realistiske øvelser i tunneler [35].

#### Brann- og eksplosjonsrisiko

I den svenske studien er det vurdert at gasskjøretøy ikke utgjør noen ytterligere risiko for veitunneler, enn hva som allerede er tillatt [2]. Tunnelkonstruksjoner er generelt robuste, og har kraftig ventilasjon som kan fortynde en eventuell gasslekkasje. Det er imidlertid ikke fullstendig enighet i litteraturen hvilken lufthastighet som er nødvendig for å ventilere store gassutslipp [21]. For at det skal oppstå en kraftig eksplosjon (detonasjon) fra en gasslekkasje i en tunnel, kreves det normalt et stort utslipp, en noe forsinket antenning, hindre som akselererer trykkbølgen og en lang tunnel.

I en studie fra 2009 ble det ved konservative beregninger vist at det er mulig å oppnå overtrykk på nærmere 12 bar når store støkiometriske gasskyer av hydrogen blir antent i en tunnel [21]. Den samme studien viser imidlertid at overtrykk i størrelsesordenen 0,1 – 0,3 bar er mer sannsynlig, noe som ikke er forventet å gjøre store materielle skader på tunnelen, men kan gi store skader på personer og biler som befinner seg i kort avstand til eksplosjonen.

Oppsummert er sannsynligheten for en kraftig gasskyeksplosjon liten på grunn av tunnelens tverrsnitt, ventilasjon og mengden gass som må til. Man kan imidlertid ikke utelukke gasstankeeksplosjon som følge av brann. En slik eksplosjon er imidlertid ikke forventet å gi alvorlige skader på en tunnel, men kan forårsake lokale skader på

stedet. Den svenske studien vurderer at sannsynligheten for en gasstankeeksplosjon som følge av brannpåvirkning på en gasstank, er større enn sannsynligheten for at en gasslekkasje skal medføre en gasskyeksplosjon i en tunnel [2]. Den konkluderer videre med at tunneler er bygget robust med tanke på brann og eksplosjon, og at utfordringen med brann i tunnel ikke er at tunnelen skal bryte sammen, men at personer ikke klarer å komme seg i sikkerhet på egen hånd. Den anbefaler imidlertid ingen ekstra tiltak enn de som allerede finnes for å håndtere denne situasjonen.

## 4.2 Parkeringskjellere

### Regelverk

Forskriften forbyr lagring av gassflasker under bakken, men forbyr ikke gasskjøretøy under bakken. Likevel stiller regelverket en rekke krav til hvordan bygg skal prosjekteres når det er fare for gasseksplosjon. Etter § 11-5 *Sikkerhet ved eksplosjon*, i TEK 10 [12] står det at byggverk, der bruk kan medføre fare for eksplosjon, skal prosjekteres med avlastningsflater slik at bæreevne og personsikkerhet ivaretas. I et høringsnotat til TEK 17 foreslås det å åpne for bruk av andre tiltak enn avlastningsflater for byggverk der forutsatt bruk kan medføre eksplosjonsfare, uten at dette er spesifisert videre.

Til tross for at det anbefales ventilasjon på minst 1 m/s og ventilasjon som kan aktiveres av gassdetektor for å hindre eksplosive forhold, er dette ikke normal praksis i dag. Mange parkeringskjellere har heller ikke god nok ventilasjon til effektivt å kunne ventilere ut gass.

Byggereglene skiller ikke mellom hvilke typer energibærere kjøretøyene har. Det er vanskelig å vite hvordan bilparken vil se ut om 10 – 20 år, men siden parkeringskjellere kan ha en levetid på mange tiår, bør det utarbeides byggeregler med tanke på fremtiden. Siden gasskjøretøy foreløpig er så lite utbredt i Norge, har parkeringskjellere normalt ikke blitt bygget med hensyn på å motstå en eksplosjon. Det bør påbegynnes et grundig arbeid allerede nå der følgende punkter må bestemmes:

- Bør parkeringsbygg utstyres med installasjoner, eksempelvis detektorer, ventilasjonsanlegg og/eller sprinkleranlegg for å redusere sannsynligheten for at en eksplosjon oppstår?
- Hvordan skal bygget sikres mot konsekvensen av en eksplosjon? Bør det være tydeligere krav om trykkavlastningsflater?
- Skal eventuelle nye regler gjelde kun for nye bygg, eller også for eksisterende bygg, og hvordan skal slike tiltak i så fall finansieres?

### Brann- og eksplosjonsrisiko

En gassky- og gasstankeeksplosjon utgjør en større risiko i en parkeringskjeller enn i en tunnel. Det finnes få naturlige avlastningsflater i en parkeringskjeller. Siden en gasskyeksplosjon består av både en primær og en sekundær trykkbølge, kan bærebjelker være utsatt for å kollapse under en slik eksplosjon. Selv om trykkbølgen fra en gasseksplosjon kan beregnes grovt, kan lokalt forhøyede trykk oppstå på grunn av at trykkbølgen reflekteres i nærliggende vegger og tak. Konsekvensen av en eksplosjon i en parkeringskjeller kan derfor variere fra kun lokale skader til svært omfattende skader.



I SP Fire Researchs forrige rapport om dette temaet ble det stilt spørsmål om en trykkavlastningsventil kunne løse ut på grunn av høy omgivelsestemperatur uten at flammer var tilstede, for eksempel som følge av høy temperatur fra brann i en parkeringskjeller [1]. I en studie ble det gjort CFD-beregninger av dette scenariet, og konkludert med at dekk og andre plastkomponenter vil spontanantenne før trykkavlastningsventilen løser ut [36]. En gasstankeeksplosjon som oppstår som følge av brann vil trolig ikke utgjøre noen ekstra risiko for personsikkerheten i forhold til en brann i en bil med konvensjonelt drivstoff. Før gasstanken eksploderer vil brannen sannsynligvis allerede ha utløst brannvarslingsanlegget. Tester har vist at det normalt tar 10 – 20 minutter før gasstanken eksploderer, noe som kan være tilstrekkelig tid til at personer kan evakuere.

Et gassutslipp vil imidlertid være vanskeligere å oppdage, siden mange parkeringskjellere ikke har gassdetektorer, og noen gasser, eksempelvis hydrogen, er luktløse og usynlige. Lekkasje kan dermed forbli uoppdaget inntil en eventuell eksplosjon skjer.

En fordel med parkeringskjellere i forhold til tunnel er at det hovedsakelig er personbiler som parkeres der, og de frakter med seg en betydelig mindre mengde gass enn hva busser og tankbiler frakter med seg gjennom en tunnel. I tillegg kjører biler med lave hastigheter i parkeringskjellere, slik at lekkasje fra en tank på grunn av en kollisjon er lite sannsynlig.

## 4.3 Gasstanker

I den svenske studien vurderes det at brannpåvirkning på gasstanker utgjør en større eksplosjonsfare enn en gasslekkasje, fordi trykkavlastningsventilene i flere hendelser har vist seg å ikke fungere slik de er tiltenkt [2]. Noe av grunnen til dette kan skyldes at den standardiserte brann testen for CNG-tanker ikke er godt nok beskrevet og ikke gir et realistisk bilde av hvordan et ekte brannforløp kan forløpe. Ulykker har vist at om tankene varmes opp lokalt, eller trykkavlastningsventilen kjøles ned av sløkkevann, kan tanken eksplodere [29] [30] [37].

Brann test standarden for hydrogen er bedre spesifisert enn standarden for CNG. Her blir først deler av tanken oppvarmet, og deretter hele tanken. Oppvarmingen skal skje via en propanbrenner og temperaturbelastningen på tanken øker til 600 °C innen 3 minutter og til 800 °C etter 12 minutter. Dette er en stor forbedring i forhold til CNG-standard. Det er også en forbedring at testen inkluderer lokal oppvarming av tanken, siden mange av ulykkene som har skjedd med gasstanker skyldes nettopp lokal oppvarming. En potensiell svakhet med test standarden er at den kun går opp til 800 °C, og at den bruker såpass lang tid før den når denne temperaturen. Til sammenligning er temperaturkurven for en hydrokarbonbrann 743 °C etter 1 minutt og 1000 °C etter 8 minutter. En mer realistisk brannkurve kunne eksempelvis ha fulgt en hydrokarbonbrannkurve.

Vi har ikke kjennskap til alvorlige ulykker der en hydrogengasstank har eksplodert som følge av brann. Om dette skyldes at tankene er bedre tillaget enn CNG-tanker, eller om det skyldes at hydrogentanker fremdeles ikke er så utbredt, og dermed sjeldnere har blitt utsatt for brann, vites ikke.

I standarden blir branntester utført på nye tanker. Etter hvert som tankene blir eldre, tåler de nødvendigvis ikke den samme trykkoppbyggingen som da de var nye. Et eksempel på dette er to tanker som eksploderte i Sverige ved 230 bars trykk, mens de var designet for å tåle opp til 400 bar. I rapporten fra den svenske studien foreslås derfor å innføre en strengere kontroll av gasstanker, og å oppdatere teststandarden for gasstanker og trykkavlastningsventiler [2].

I Sverige har de erfart at gasstanker ikke blir periodisk inspisert, og det mistenkes at dette er en av grunnene til at ulykker skjer. I Norge har vi ikke hatt like mange gasstankulykker som i Sverige, trolig på grunn av det lave antallet gasskjøretøy som finnes i Norge. Imidlertid har det også i Norge vært utfordrende å følge opp serviceintervaller for gasskjøretøy, fordi personbiler hovedsakelig er ombygde biler og står registrert som bensinbiler i kjøretøyregisteret. Verksteder som utfører ombyggingen har heller ikke ansvar for å sjekke opp at kunden følger serviceintervallene. Antallet ombygde kjøretøy er lavt, og i framtiden vil gasskjøretøy hovedsakelig være masseproduserte kjøretøy. Disse vil trolig følges opp tettere av leverandør og merkeverksted, i alle fall så lenge kjøretøyet har garanti.

## 4.4 Redningsinnsats

Redningsmannskapers primære oppgave er å redde liv, og deretter redde verdier. Dette skal utføres på en måte som ikke setter brannmannskapenes egen helse i fare. En brann i en tunnel eller parkeringskjeller er en utfordrende situasjon uavhengig av hva som brenner, men gassbeholdere der trykkavlastningsventilen ikke er utløst vil kunne utgjøre et ekstra usikkerhetsmoment.

En brann i en parkeringskjeller kan være utfordrende på grunn av dårlig sikt, høy varme, lange avstander og dårlig tilkomst. Dersom det i tillegg finnes gasskjøretøy i parkeringskjelleren, og en gasstankeeksplosjon potensielt kan skje, vil dette kunne føre til at redningsinnsatsen blir forsinket, på grunn av at ekstra sikkerhetsrutiner må følges.

Redningsmannskaper vil ha en viktig rolle når det gjelder allmenn aksept av gasskjøretøy i parkeringskjellere. Dersom redningsmannskaper har tilstrekkelige kunnskaper om risikoen og føler seg trygge, vil dette kunne påvirke forsikringsbransjen og private aktører. I motsatt fall vil redningsmannskapers skepsis til gasskjøretøy kunne medføre at forsikringsbransjen øker forsikringspremier, og at private garasjeiere ikke tillater parkering av gasskjøretøy, uavhengig av om forskriftene tillater det.

For å legge til rette for en mest mulig smidig innføring av gasskjøretøy i Norge, er det derfor viktig at redningsmannskaper har anledning til å øve på relevante og realistiske scenarier, og at de blir inkludert i det risikoforebyggende arbeidet. Det bør også lages et lett tilgjengelig register over tidligere hendelser, for å lære av disse<sup>6</sup>. For eksempel har det skjedd at brannmannskaper har kjølt ned gasstanken i forbindelse med brann for å unngå en eksplosjon. Nedkjølingsprosessen bidro til at også trykkavlastningsventilen ble kjølt ned, slik at denne ikke løste ut når den skulle, og tanken eksploderte [32].

---

<sup>6</sup> Det finnes allerede et slikt internasjonalt register for hydrogen (HIAD), men det er uvisst i hvor stor grad brannvesen benytter dette for å lære.

I senere år har det blitt mer fokus på å redusere røykdykkes eksponering for røyk og farlige gasser, ettersom det er påvist at brannmenn har en forhøyet risiko for enkelte krefttyper [38]. Parkeringskjellere har også vist seg å være objektet som gir flest alvorlige skader for røykdykkere ved redningsinnsats [39]. En framtidsrettet løsning kan i større grad være å ta i bruk droner og roboter for å utføre de mest risikofylte oppgavene.

## 4.5 Vurdering av risikoreduserende tiltak

En rekke tiltak som kan bidra til å redusere risikoen for gasseksplasjon i parkeringskjellere er beskrevet i kapittel 3.6. Noen fordeler og ulemper ved disse relatert til brannsikkerhet er diskutert i Tabell 4-1.

**Tabell 4-1 Fordeler og ulemper ved foreslåtte risikoreduserende tiltak**

Tiltak	Fordeler (+) / ulemper (-)
Innføre store romvolum	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Et stort romvolum vil redusere sannsynligheten for gassakkumulering, og vil være positivt med hensyn til trykkavlastning.</li> <li>- For brannsikkerheten er store brannceller uheldig, fordi brannen kan bli svært stor og vanskelig å håndtere.</li> </ul>
Innføre trykkavlastende vegger	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Trykkavlastende vegger lettere enn 10 kg/m<sup>3</sup> vil kunne absorbere noe av trykket ved en eksplosjon, slik at trykket på bærebjelker og vegger blir redusert.</li> </ul>
Større avstand mellom biler	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Større avstand mellom biler vil ikke nødvendigvis forhindre brannspredning mellom biler, men bidra til en viss forsinkelse av brannspredning, og dermed gi brannvesenet bedre tid før brannen sprer seg. En studie har vist at brann i et innelukket rom kan spre seg over en tom parkeringsplass.</li> </ul>
Montering av sprinkleranlegg	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Statistikk viser at et sprinkleranlegg ikke nødvendigvis slokker en brann, men kjøler ned brannen og omgivelsene tilstrekkelig til at brannen ikke sprer seg. Hvis brannen ikke oppstår i selve gasskjøretøyet, vil sannsynligheten for brannspredning til gasskjøretøyet, og påfølgende gasstankeeksplasjon, reduseres betraktelig ved sprinkling.</li> <li>- Uten en brann vil ikke et sprinkleranlegg kunne forhindre gasskyeksplasjon.</li> <li>- Foreløpig finnes det ingen kjente ulykker der en brann har ført til at en hydrogentank har eksplodert.</li> </ul>
Gasskjøretøy kun på bestemte plasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Dette forslaget vil kunne gi brannmannskaper en mer forutsigbar situasjon.</li> <li>- Feilparkeringer kan skje.</li> <li>- I borettslag er det utfordrende å endre plassering av kjøretøy, fordi plassene er private.</li> </ul>
Bedre brannmotstand og bedre testing av gasstanker	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Ved å øke realismen til teststandardene, og øke krav til brannmotstanden til tanken, vil oppførselen til gasstankene bli mer forutsigbar, og på sikt bidra til at en optimal aktiv innsats kan rettes mot brennende gasskjøretøy.</li> </ul>

---

Ventilasjon koblet til deteksjon av gass	+ Tiltaket vil redusere sannsynligheten for at et gassutslipp akkumuleres og antennes.
	- Tiltaket vil ikke kunne avverge en gasstankeeksplosjon.
Bedre oppfølging av periodiske kontroller av gasstanker	+ Jevnlig inspeksjon vil sikre at tankene holder en god nok standard.

---

I rapporten fra den svenske studien foreslås følgende tiltak som mest effektive (ikke i prioritert rekkefølge) [2]:

1. Mer robuste tanker og en mer realistisk teststandard.
2. Sprinkling av offentlige parkeringskjellere.
3. Bedre oppfølging av periodiske kontroller av gasstanker.

Når det gjelder tiltak 1, så er vi enige i at teststandardene bør bli bedre, men vi mener at det er CNG-standarden som har de største svakhetene. I Norge vil det i framtiden hovedsakelig være personbiler med hydrogen som parkeres i parkeringskjellere, og ikke CNG-kjøretøy. Selv om teststandarden for hydrogentanker er bedre beskrevet enn for CNG-tanker, bør relevansen av hydrogentankstandarden med hensyn til å ivareta brann- og eksplosjonssikkerheten i parkeringskjellere kartlegges nærmere.

Tiltak 2, sprinkling av offentlige parkeringskjellere, vil ha en positiv effekt på å forhindre konsekvensene av hvilken som helst brann. På grunn av at CNG-tanker i noen tilfeller har eksplodert ved brann, kan sprinkling være et godt alternativ for å redusere eksplosjonsfaren for CNG-kjøretøy, fordi det vil kjøle ned brannen og redusere sannsynligheten for brannspredning til et gasskjøretøy fra et annet kjøretøy. På grunn av manglende statistikk på branner i hydrogenkjøretøy, har vi ikke grunnlag til å vurdere om et sprinkleranlegg er et effektivt tiltak for å redusere sannsynligheten for eksplosjon i et hydrogenkjøretøy. Et sprinkleranlegg vil imidlertid uansett redusere sannsynligheten for at en bilbrann sprer seg til et hydrogenkjøretøy.

Tiltak 3 er viktig for å få på plass et godt nok system som sørger for at gasstanker blir kontrollert jevnlig.

I tillegg til disse tre tiltakene, mener vi at det er viktig å gi brannmannskaper tilstrekkelig opplæring og muligheter til å gjennomføre realistiske øvelser, slik at de kan møte disse nye utfordringene på en måte som ikke setter andre eller seg selv i unødvendig fare.

## 4.6 Brann- og eksplosjonsrisiko ved gasser

På bakgrunn av den gjennomgåtte litteraturen, vurderes hydrogen til å utgjøre en større risiko enn CNG i innelukkede rom. Dette bygger på følgende:

- CNG har et relativt smalt antennelsesområde (5 – 15 %), mens hydrogen har et bredt antennelsesområde (4 – 75 %).
- Hydrogen har raskere flammehastighet enn CNG, og antennesenergien for hydrogengass er ca. en tidel i forhold til gass av hydrokarboner [40].
- Hydrogenutslipp har en tendens til å selvantenne [41].
- Detonasjon på grunn av hydrogengass kan skje hvis trykkbølgen møter mange fysiske hindre, men er mindre sannsynlig for CNG [13].
- Simuleringer viser at det maksimale overtrykket fra store gasskyer av henholdsvis hydrogen og CNG varierer betydelig. Det maksimale overtrykket ved et 1000 m<sup>3</sup> (67 kg i støkiometrisk blanding) CNG-utslipp ble i en konservativ beregning beregnet til 0,6 bar, mens en 1000 m<sup>3</sup> (24 kg i støkiometrisk blanding) luft-hydrogen-blanding ga 12 bar overtrykk [21].

Annen informasjon (se kapittel 4.3) taler imidlertid for at hydrogentanker er bedre beskyttet mot brann enn CNG-tanker, og at sannsynligheten for at en hydrogentank eksploderer ved brann dermed kan være mindre.

## 5 Konklusjon

Regelverket som ivaretar brann sikkerheten i tunneler, er generelt godt nok tilpasset risikoen som økt utbredelse av gasskjøretøy medfører, men ordlyden i forskriftsteksten kan bli tydeligere. Slik norske tunneler er konstruert, er ikke gassekspløsjoner forventet å skade tunnelens konstruksjon slik at den kollapser.

For parkeringskjellere vil det være hensiktsmessig å tydeliggjøre og oppdatere regelverket på en rekke områder. Siden parkeringskjellere har en levetid på mange tiår, bør parkeringskjellerne som bygges i dag være rustet for kjøretøyene som vil dominere trafikkbildet de neste 10 – 20 årene. En parkeringskjeller er ikke like robust bygd som en tunnel, og har få trykkavlastningsflater. En gassekspløsjon vil derfor kunne få konsekvenser for bygget. I verste fall kan bærebjelker bli slått over ende av trykkbølgen, og deler av taket kan kollapse. Dette bør vurderes med hensyn til prosjektering og drift.

Det har vært en rekke ulykker der CNG-tanker har eksplodert når de har blitt utsatt for brann. Teststandarden CNG-tanker testes mot i dag er ikke tilstrekkelig realistisk, og en måte å redusere antallet ulykker på, kan være å stille strengere krav til hvordan disse tankene brantestet.

Hydrogentanker testes mot en mer realistisk teststandard, og vi har ikke kjennskap til ulykker der en hydrogentank har eksplodert som følge av en brann.

Tiltakene som vurderes som mest effektive i Sverige, vil ikke nødvendigvis ha samme effekt i Norge. Dette bygger på følgende:

- Ved å sprinkle en parkeringskjeller vil man i stor grad hindre brannspredning mellom kjøretøy, og såfremt en brann ikke starter i selve hydrogenkjøretøyet, vil sprinkling redusere sannsynligheten for en brann i et hydrogenkjøretøy. Det er noe usikkert hvorvidt en brann i et hydrogenkjøretøy kan forårsake at hydrogentanken eksploderer. Det er derfor vanskelig å vurdere om et sprinkleranlegg er et effektivt tiltak for å redusere sannsynligheten for at en hydrogenekspløsjon finner sted.
- Det foreslås forbedrede teststandarder for gasstanker. Vi er enige i at CNG-teststandarden har en rekke svakheter og bør forbedres. En rekke ulykker underbygger denne påstanden. Hydrogenstandarden er en bedre standard, og vi har ikke oversikt over ulykker der brann har ført til en ekspløsjon. Det er hovedsakelig personbiler som parkeres i parkeringskjellere. Det finnes få personbiler med CNG-tanker i Norge, mens det er forventet at antallet personbiler drevet på hydrogen vil øke i framtiden. Det er dermed usikkert hvor stor effekt dette tiltaket vil ha for parkeringskjellere i Norge.
- I Sverige foreslås et system for bedre kontroll av gasstanker. Dette er et viktig tiltak også for norske forhold.

Et annet viktig tiltak er å sørge for at brannmannskaper får tilstrekkelig opplæring og øvelser for å kunne møte hendelsene som involverer gasskjøretøy, slik at de ikke utsetter seg selv for unødvendig fare.

Som del av et videre arbeid bør det gjøres en grundig vurdering av hvilken effekt en hydrogentank- og en hydrogenskyeksplosjon vil ha på typiske, norske parkeringskjellere. I tillegg kan det være hensiktsmessig å gjøre konservative branntester av hydrogentanker for å få mer informasjon om hvor godt de tåler ulike brannbelastninger. Til sammen vil dette gi et bedre grunnlag for å vurdere hvilke tiltak som er nødvendige. Også kost-nytte analyser bør legges til grunn for å vurdere hvilke tiltak som er mest effektive.

## Referanser

- [1] N. K. Reitan and A. Bøe, “Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom,” SP Fire Research AS, Trondheim, Norway, A16 20096-1:1, feb. 2016.
- [2] J. Gehandler, P. Karlsson, and L. Vylund, “Risker med nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage,” SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, Sweden, 2016:84, 2016.
- [3] A. Lönnermark, “Special Fire Risks Associated with New Energy Carriers,” presented at the Fires in Vehicles (FIVE), 2010.
- [4] “Gasdrivna fordon - hendelser och standarder,” Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), MSB 1011, sept. 2016.
- [5] Statistisk sentralbyrå, “Tabell 07849 - Registrerte kjøretøy, etter kjøringens art og drivstofftype (K).” .
- [6] “Nasjonal transportplan 2018 - 2029.” Avinor, Jernbaneverket, Kystverket, Statens vegvesen, 29. feb. 2016.
- [7] Justis- og beredskapsdepartementet, *Lov 14. juni 2002 nr. 20 om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver*. 2002.
- [8] Samferdselsdepartementet, *Forskrift 4. oktober 1994 nr. 918 om tekniske krav og godkjenning av kjøretøy, deler og utstyr (kjøretøyforskriften)*. 2016.
- [9] Samferdselsdepartementet, *Forskrift 15.mai 2007 nr. 517 om sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften)*. 2007.
- [10] *Håndbok N500 Vegtunneler*. Staten vegvesen, 2016.
- [11] *Forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen*. 2009.
- [12] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 26. mars 2010 nr. 489 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10)*. 2010.
- [13] D. Bjerketvedt, J. R. Bakke, and K. van Wingerden, “Gas Explosion Handbook,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 52, pp. 1–150, 1997.
- [14] Direktoratet for byggkvalitet, *Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK10)*. 2016.
- [15] “UNECE Regulation No. 110 - Rev. 3 - CNG and LNG vehicles.” UNECE, 25. juni 2014.
- [16] “UNECE Regulation No. 134 - Hydrogen and fuel cell vehicles.” UNECE, juni 2015.
- [17] “GTR 13 ECE - Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles.” UNECE, juni 2013.
- [18] Z. Y. Li, D. Makarov, and J. Keenan, “CFD study of the unignited and ignited hydrogen releases from TPRD under a fuel cell car,” presented at the International conference on hydrogen safety, Yokohoma, Japan, 2015.
- [19] M. Groethe, E. Merilo, J. Colton, and S. Chiba, “Large-scale hydrogen deflagrations and detonations,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, pp. 2125–2133, 2007.
- [20] S. Kumar *et al.*, “HyTunnel project to investigate the use of hydrogen vehicles in road tunnels,” presented at the 3rd International Conference on Hydrogen Safety (ICH3), Corsica. France, 2009.
- [21] Middha, Prankul and O. R. Hansen, “CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, pp. 5875–5886, feb. 2009.



- [22] H. Ingason, Y. Z. Li, and A. Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*, 1st ed. Springer New York.
- [23] “Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces - Results from InsHyde,” HySafe – Safety of Hydrogen As an Energy Carrier, Sixth framework programme network of excellence Deliverable D113, 2009.
- [24] F. Van den Schoor, P. Middha, and E. Van den Bulck, “Risk analysis of LPG (liquified petroleum gas) vehicles in enclosed car parks,” *Fire Safety Journal*, vol. 57, pp. 58–68, feb. 2013.
- [25] D. Lowell, “Natural Gas Systems: Suggested Changes to Truck and Motorcoach Regulations and Inspection Procedures,” U.S. Department of Transportation, FMCSA-RRT-13-044, 2013.
- [26] P. C. Collier, “Car Parks - Fires Involving Modern Cars and Stacking Systems,” BRANZ, SR 255, 2011.
- [27] D. Joyeux and J. Kruppa, “Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings,” European Commission, EUR 20466, 2002.
- [28] “Fire spread in car parks,” BRE, London, UK, BD2552, des. 2010.
- [29] L. Perette and H. K. Widemann, “CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany,” presented at the Society of automotive engineer world Congress, Detroit, USA, 2007.
- [30] R. Zalosh, “CNG and Hydrogen Vehicle Fuel Tank Failure Incidents, Testing, and Preventive Measures,” in *42nd annual loss prevention symposium (LPS)*, New Orleans, LA, 2008.
- [31] R. Zalosh and N. Weyandt, “Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test,” presented at the SAE 2005, 2005.
- [32] “5 fuel tanks explode as firefighters battle trash truck blaze,” *www.indystar.com*, 28. januar 2015. Tilgjengelig på: <http://www.indystar.com/story/news/2015/01/27/trash-truck-explodes-near-the-westfield/22394755/>. Besøkt 5. des. 2016.
- [33] “Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD).” Tilgjengelig på: [https://odin.jrc.ec.europa.eu/hiad/event\\_search.hiad?action=submit](https://odin.jrc.ec.europa.eu/hiad/event_search.hiad?action=submit). Besøkt 19. jan. 2017.
- [34] “Taktik och Metodik vid brand i Undermarksanläggningar (TMU),” MSB, MSB 847-2015, 2015.
- [35] A. Lönnemark, Vylund, Lotta, H. Ingason, and A. Palm, “Rekommendationer för räddningsinsatser i undermarksanläggningar,” SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, 2015:19, 2015.
- [36] Y. Tamura and K. Sato, “The possibility of an accidental scenario for marine transportation of fuel cell vehicle: Hydrogen releases from TPRD by radiant heat from lower deck,” *Int. J. Hydrog. Energy*.
- [37] T. Berg, “Analys av vätgassäkerhet i tunnlar och undermarksanläggningar,” SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden, 2014:72, 2014.
- [38] G. K. LeMaster, A. M. Genaidy, P. Succop, and J. Deddens, “Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies,” *JOEM*, vol. 48, no. 11, nov. 2006.
- [39] J. Nordström, “Ett MTO-perspektiv på rökdykning - Arbetssuppgiften, tillbud og olyckor,” KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.
- [40] “Clean air program summary of assessment of the safety, health, environmental and system risks of alternative fuels,” U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration, 1995.
- [41] G. R. Astbury and S. J. Hawksworth, “Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2178–2185, 2007.

## A Person- og bygningsskader ved ulike eksplosjonstrykk

Konsekvenser som følge av en eksplosjon:

- *Primær skade* er knyttet til direkte effekt av trykkbølgen på mennesker. De mest alvorlige skadene er på områder av kroppen der det er store tetthetsforskjeller mellom nærliggende vev, som eksempelvis lunger, ører, mage og svelg.
- *Sekundær skade* skyldes skader fra splinter som blir dannet i eksplosjonen. Splinter kan forårsake både ytre og indre skader.
- *Tertiær skade* er skader som skyldes at hele kroppen blir flyttet på eller slått over ende, og som oppstår i sammenstøt med fysiske hindringer.

**Tabell A-1** Konsekvenser på mennesker og bygninger ved ulike overtrykk

	Overtrykk (kPa <sup>7</sup> )	Beskrivelse av skade
Direkte effekt på mennesker <sup>8</sup>	14	Grense for skade på trommehinne
	34 – 48	50 % sannsynlighet for skade på trommehinne
	48	Grense for indre skader
	69 – 103	90 % sannsynlighet for skade på trommehinne
	83 – 103	Grense for lungeblødning
	1378 – 172	50 % dødelighet pga. lungeblødning
	206 – 241	90 % dødelighet pga. lungeblødning
	482 – 1379	Øyeblikkelig død
Indirekte effekt på mennesker <sup>20</sup>	7 – 14	Grense for hudskader av splinter
	10 – 20	Mennesker blir slått i bakken av trykkbølge
	14	Mulig død dersom man blir kastet mot hindringer
	27 – 35	50 % dødelighet fra splintskader
	48 – 69	100 % dødelighet fra splintskader
	55 – 110	Mennesker blir kastet flere meter bortover
Effekt på bygninger <sup>9</sup>	1	Grense for knusing av glass
	12 – 20	Kollaps av murvegg
	30 – 50	Omfattende ødeleggelse av bygning med stålkonstruksjon
	70 – 80	Total ødeleggelse av de fleste bygningstyper

<sup>7</sup> 101 kPa tilsvarer 1 bar.

<sup>8</sup> R. M. Jeffries, L. Gould, D. Anastasiou, and A. P. Franks, "Derivation of fatality probability functions for occupants of buildings subject to blast loads." 1996.

<sup>9</sup> A. E. Cote, J. R. Hall, P. A. Powell, C. C. Grant. "Fire Protection Handbook" 19th edition, vol. 1, Tabell 2.8.1. 2003

## B Brann- og eksplosjonsteori

Når en luft-gass blanding antennes starter reaksjonen ved antenneskilden og brer seg utover i den eksplosive blandingen med en flammefront. Forbrenningen av gassen fører til lokalt forhøyet temperatur som tar større plass enn den uforbrente gassen, noe som bidrar til en trykkbølge. Forholdet mellom brennbar gass og luft påvirker hvor raskt flammefronten brer seg, og den raskeste propageringen skjer når blandingen er stokiometrisk, dvs. et optimalt forhold mellom luft og gass.

Det skiller mellom to typer eksplosjoner som kan oppstå i forbindelse med gasskjøretøy.

- *Gasskyeksplosjon*: Dersom en lekkasje oppstår fra tanken, vil gass kunne akkumulere, blande seg med luft og antenne.
- *Gasstankeeksplosjon*: Dersom en gassbeholder blir utsatt for en varmpåkjønning, vil gasstrykket øke. Trykket vil øke til enten en trykkavlastningsventil slipper ut gassen, eller til beholderen ikke klarer å motstå trykket og revner.

Når vi snakker om eksplosjoner skiller det mellom *deflagrasjon* og *detonasjon*.

### Deflagrasjon

En deflagrasjon er det vanligste fenomenet som skjer når en gass antennes. Når en gassky antennes beveger flammefronten seg i alle retninger (sfærisk utbredelse), i starten med en hastighet på kun et par meter i sekundet. Når flammefronten treffer veggen, vil den propagere videre gjennom tunnelens tverrsnitt. Flammefronten er en overgang mellom uforbrent og forbrent gass. Forbrenningen av gassen fører til lokalt forhøyet temperatur som tar større plass enn den uforbrente gassen, noe som bidrar til en volumekspansjon og en trykkbølge. Trykkgradienten fører til en ustabil flammefront som fører til en økt flammeoverflate. Som et resultat akselerer forbrenningshastigheten og hastigheten til flammefronten. Ytterligere akselerering skjer når biler og andre hindre står i veien for trykkbølgen. Den økende hastigheten fører til ytterligere turbulens og flammefronten blir en blanding av forbrent og uforbrent gass. Dersom denne prosessen fortsetter kan en deflagrasjon gå over til en detonasjon.

En deflagrasjon kjennetegnes av en flammefront som beveger seg subsonisk, dvs. med en hastighet opp til lydhastigheten (340 m/s). Overtrykk fra en deflagrasjon når sjelden høyere enn 0,5 bar, men kan under optimale betingelser i innelukkede rom oppnå rundt 8 bar.

### Detonasjon

Som et resultat av en veldig turbulent blanding av varme reaksjonsprodukter og kald uforbrent gass, kan lokale slokkinger av flammefronten oppstå. En svært reaktiv blanding av forbrent og uforbrent gass vil da utvikles og et plutselig temperaturhopp kan føre til en lokal overtrykksbølge som kraftig forsterker flammehastigheten. En detonasjon er en flammefront som beveger seg i supersonisk hastighet, dvs. med en hastighet raskere enn lydhastigheten. En detonasjon fører til mye kraftigere trykkbølger, opp til 20 bar.

En gasskyeksplosjon av en hydrokarbon-luft blanding i det fri gir normalt neglisjerbare trykk, og dødsfall direkte forårsaket av trykkbølgen fra en eksplosjon er uvanlig [13]. Når personer blir skadet eller omkommer skyldes dette som regel en indirekte årsak, for eksempel at bygninger faller ned eller at splinter og bygningsdeler slynges rundt og treffer personer, eller at personer blir slått overende og lander på et hardt eller skarpt objekt. Mer informasjon om hvilke følger ulike trykk har på personer og bygninger finnes i vedlegg A.

En faktor som imidlertid øker risikoen for en rask flammespredning og høyere trykk er fysiske hindringer. De fysiske hindringene begrenser gassens ekspansjon, og fører til turbulens og økt trykk. Jo flere hindre i veien, desto høyere blir trykket. Eksplosjoner i bygninger blir ofte begrenset av hindre som fører til turbulens, og et kraftigere overtrykk. I en tunnel er blant annet vifter, lysarmaturer og biler eksempler på elementer som kan bidra til turbulens og høyere trykk [13].

## C Store parkeringskjellerbranner

Dette er en sammenstilling av store branner som har skjedd i Europa i løpet av de siste 12 årene.

- I 2004 omkom sju brannmenn under en innsats i en parkeringskjeller da taket kollapset som følge av brann<sup>10</sup>.
- I 2006 oppstod en brann i en usprinklet parkeringskjeller tilknyttet et sykehjem. Brannen ødela 22 biler og spredte seg til etasjen over via eksterne vinduer. Mer enn 60 personer måtte evakueres, og en person omkom etter å ha pustet inn giftig røyk. Et sprinkleranlegg installert i sykehjemmet forhindret videre spredning og bidro til at mange liv ble spart<sup>11</sup>.
- I 2010 i Haarlem (Nederland) startet en brann i den nederste av to underjordiske etasjer, og spredte seg raskt til 26 biler. Brannen var så intens at brannmannskaper ikke kunne bevege seg helt inn til brannen. Konstruksjonen ble kraftig skadd under brannen og var nær å kollapse. Midlertidige støttebjelker ble satt inn og forhindret kollaps. Brannen ble til slutt slokket ved å fylle hele nedre etasje med vann<sup>12</sup>.
- I 2010 begynte det å brenne i en åpen parkeringsgarasje ved Stanstead flyplass. Det tok 25 brannmenn mer enn to timer å få flammene under kontroll. Brannen førte til at 24 biler ble fullstendig utbrent<sup>13</sup>.
- I 2014 begynte det å brenne i en parkeringskjeller i Pars, og 50 biler ble totalskadd. Mer enn 80 brannmenn deltok for å få kontroll på flammene. Et teater og en domstol som lå like ved fikk store røykskader, og måtte holde stengt i en lang periode<sup>14</sup>.

---

<sup>10</sup> Firehouse. "Seven Swiss Firefighters Die in Collapsed Parking Garage," tilgjengelig på: <http://www.firehouse.com/news/10514192/seven-swiss-firefighters-die-in-collapsed-parking-garage>. Besøkt 16. des. 2015.

<sup>11</sup> BBC News. "Blaze forces elderly from flats," tilgjengelig: [http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk\\_news/england/bristol/somerset/6196281.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/bristol/somerset/6196281.stm). Besøkt 11. feb. 2016.

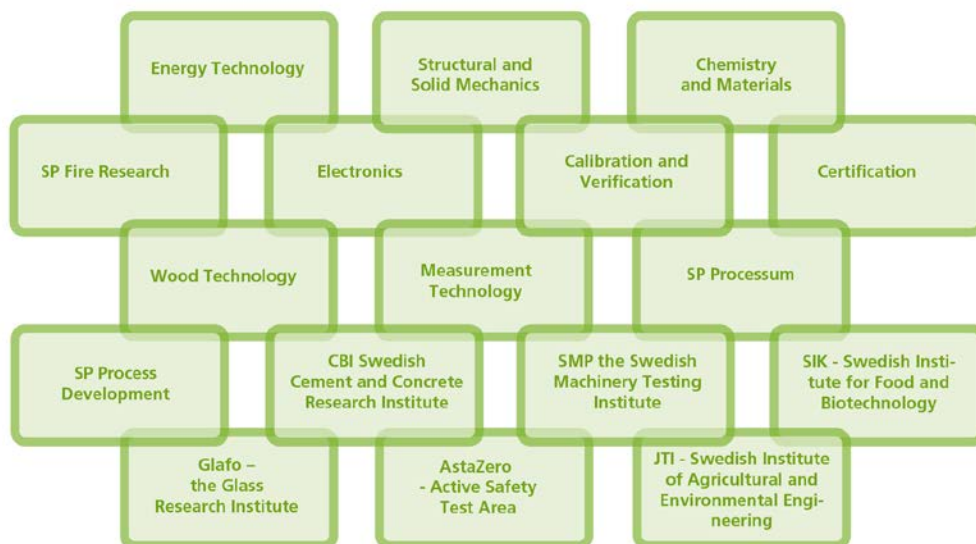
<sup>12</sup> "The Fire Protection of Modern Day Car Parks," *Fire Middle East – The official fire & rescue magazine for intersec*, 2012:15.

<sup>13</sup> MailOnline. "Had a good break, Sir? Now about the vehicle you left in the long term car park. . . 20 families' cars gutted at Stansted," tilgjengelig: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1307422/Stansted-Airport-20-families-cars-gutted-car-park-blaze.html#ixzz4bTIPTzyz>. Besøkt 12. feb. 2016.

<sup>14</sup> European Fire Sprinkler Network. "Another Major Car Park Fire in Paris," tilgjengelig: <http://eurosprinkler.org/another-major-car-park-fire-in-paris>. Besøkt 12. feb. 2017.

## SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



### SP Fire Research AS

Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim

Telefon: 464 18 000

E-post: [post@spfr.no](mailto:post@spfr.no), Internett: [www.spfr.no](http://www.spfr.no)

[www.spfr.no](http://www.spfr.no)

SPFR-rapport A 17 20096-04:01

For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP Fire Research og SP:  
[www.spfr.no/publikasjoner](http://www.spfr.no/publikasjoner) og [www.sp.se/publ](http://www.sp.se/publ)