

# Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom

Nina K. Reitan, Andreas G. Bøe, Jan P. Stensaas

SP Fire Research AS

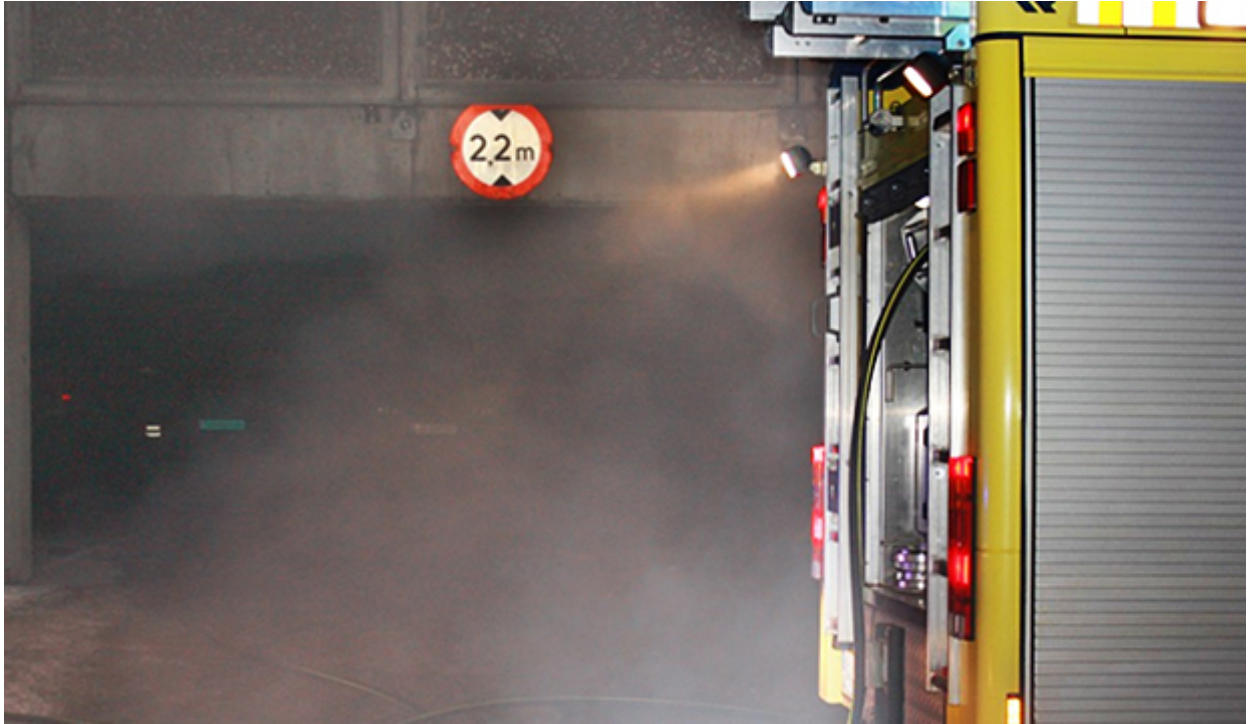


Foto: Gisle Jørgensen, NRK Rogaland

# Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom

<b>VERSJON</b> 2	<b>DATO</b> 2016-02-23	<b>NØKKELOORD:</b>  Brann Elkjøretøy Gasskjøretøy Hydrogen Brenselcelle LPG CNG Parkeringskjeller Tunnel Regelverk
<b>FORFATTERE</b> Nina K. Reitan, Andreas G. Bøe, Jan P. Stensaas		
<b>OPPDRAGSGIVERE</b> Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK)	<b>OPPDRAGSGIVERS REF.</b> Berit Svensen, Jostein W. Grav og Trond Andersen	
<b>PROSJEKTNR.</b> 20096	<b>ANTALLSIDER OG VEDLEGG:</b> 48 + 5 vedlegg	

## SAMMENDRAG

Det er en økende satsning på bruk av alternative energibærere i transportsektoren. I Norge var antallet elbiler og ladbare hybrider passert 74.000 i september 2015, antall gassbusser øker, og et økende antall hydrogendrevne kjøretøy er et nasjonalt mål. Alternative energibærere har andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn konvensjonelt, fossilt brensel, og medfører ukjente problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet, spesielt i innelukkede rom.

I denne rapporten kartlegges brannrelaterte problemstillinger ved el- og gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom, med hovedvekt på parkeringskjellere. Det vurderes om gjeldende praksis og regelverk gir tilstrekkelig forebygging av brannrelaterte ulykker i innelukkede rom, og om brann- og redningsmannskap har kunnskap og prosedyrer til å håndtere denne typen ulykker på en sikker måte. Videre nevnes konkrete tiltak som bør tas opp til vurdering.

<b>UTARBEIDET AV</b> Nina K. Reitan	<b>SIGNATUR</b>		
<b>KONTROLLERT AV</b> Anne Steen-Hansen	<b>SIGNATUR</b>		
<b>GODKJENT AV</b> Paul Halle Zahl Pedersen	<b>SIGNATUR</b>		
<b>RAPPORTNR.</b> A16 20096-1:1	<b>ISBN</b>	<b>GRADERING</b> Åpen	<b>GRADERING DENNE SIDE</b> Åpen

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1	27.01.2016	Første versjon
2	23.02.2016	Endring er gjort i: <ul style="list-style-type: none"><li>- «Sammendrag» (s 5), avsnitt «Konklusjoner... Spesifikt for parkeringskjellere:...»</li><li>- «Summary» (s 6), avsnitt «Conclusions... Specific issues for parking basements:...»</li></ul>

---

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Definisjoner og forkortelser</b>	<b>7</b>
<b>Innledning</b>	<b>9</b>
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Målsetting	10
1.3 Metode	10
1.4 Avgrensninger	10
<b>2 Utbredelse av drivstofftyper i Norge</b>	<b>12</b>
2.1 Status i dag	12
2.2 Fremtidig mål og prognoser	14
<b>3 Brann- og eksplosjonssikkerhet for ulike drivstoffer i kjøretøy</b>	<b>15</b>
3.1 Fossile drivstoffer	15
3.2 Metanol og etanol	15
3.3 Elkjøretøy	16
3.4 Gassdrevne kjøretøy	20
3.5 Ombygde kjøretøy	25
<b>4 Brannutvikling i innelukkede rom</b>	<b>26</b>
4.1 Parkeringsbygg	27
4.2 Skip	32
4.3 Tunnel	33
<b>5 Diskusjon</b>	<b>35</b>
5.1 Elkjøretøy i innelukkede rom	35
5.2 Gasskjøretøy i innelukkede rom	36
5.3 Parkeringskjellere	38
5.4 Øvrige risikofaktorer	41
<b>6 Konklusjon</b>	<b>42</b>
6.1 Elkjøretøy	42
6.2 Gassdrevne kjøretøy	43
6.3 Parkeringskjellere	43
<b>Referanser</b>	<b>44</b>
<b>Vedlegg A</b> Fremdriftsteknologier og drivstoffer	
<b>Vedlegg B</b> Utbredelse av drivstofftyper i Norge	
<b>Vedlegg C</b> Branntekniske egenskaper for væsker og gasser brukt som drivstoff i transport	
<b>Vedlegg D</b> Person- og bygningsskader på grunn av eksplosjon	
<b>Vedlegg E</b> Thermal runaway	

## Forord

Denne kartleggingsstudien er gjennomført på oppdrag fra Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). Bakgrunnen for studien er at den økende andelen kjøretøy med alternative energibærere skaper nye og ukjente brannrelaterte problemstillinger i innelukkede rom, som eksempelvis parkeringsbygg, tunneler og ferjer. Usikkerheten har medført at brannvesenet i enkelte tilfeller har reservert seg mot innsats, og det eksisterer en inkonsekvent praksis med hensyn til hvilke kjøretøy som tillates i innelukkede rom. Det er derfor nødvendig med en gjennomgang av risikoen og en tydeliggjøring av regelverket.

Det finnes internasjonal forskning innenfor de ulike problemstillingene som er nevnt i denne rapporten, men det mangler en helhetlig oversikt over status for norske forhold. Et moment som skiller Norge fra andre land, er den høye andelen kjøretøy med alternative energibærere i forhold til antallet biler på veiene, et høyt antall tunneler, og antall underjordiske parkeringsanlegg (private og offentlige) er også økende. En kartlegging av de nevnte problemstillingene sett med norske øyne, samt kunnskapsformidling og vurdering av om tiltak er nødvendig, vil på sikt bidra til en tryggere innfasing av alternative energibærere i transportsektoren.

Til denne kartleggingsstudien har vi fått mange gode innspill fra ulike aktører med interesse for temaet, og vi vil rette en spesiell takk til disse bidragsyterne.

Nina K. Reitan  
Prosjektleder

Trondheim, 23. februar 2016

# Sammendrag

## Bakgrunn

Det er en økende satsning på bruk av alternative energibærere i transportsektoren. I Norge var antallet elbiler og ladbare hybrider passert 74.000 i september 2015, antall gassbusser øker, og et økende antall hydrogendrevne kjøretøy er et nasjonalt mål. Alternative energibærere har andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn konvensjonelt, fossilt brensel, og medfører ukjente problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet, spesielt i innelukkede rom.

## Målsetting

I denne rapporten kartlegges brannrelaterte problemstillinger ved el- og gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom, med hovedvekt på parkeringskjellere. Det vurderes om gjeldende praksis og regelverk gir tilstrekkelig forebygging av brannrelaterte ulykker i innelukkede rom, og om brann- og redningsmannskap har kunnskap og prosedyrer til å håndtere denne typen ulykker på en sikker måte. Videre nevnes konkrete tiltak som bør tas opp til vurdering.

## Metode

Informasjonen er innhentet ved søk i litteratur og nyhetsartikler, gjennomgang av regelverk og kommunikasjon med relevante aktører.

## Konklusjoner

Det er fremdeles for lite kunnskap om forebygging av, og potensielle konsekvenser ved, brann eller eksplosjon i el- og gasskjøretøy i innelukkede rom.

Sammenlignet med brannrisikoen for konvensjonelle kjøretøy i innelukket rom, ser vi følgende viktige utfordringer ved el- og gasskjøretøy i innelukkede rom:

- Elkjøretøy:
  - o Potensielt lang sløkkesetid og høyt vannforbruk
  - o Fare for reantenneing etter sløkking
- Gasskjøretøy
  - o Risiko for ikke-fungerende sikkerhetsmekanismer
  - o Hvis gassen akkumuleres i innelukket rom, kan selv små utslipp føre til eksplosjon.

Spesifikt gjelder for parkeringskjellere:

- Å slukke en bilbrann i en parkeringskjeller kan være svært utfordrende, uavhengig av hvilke drivstoffer som er involvert. Dette skyldes vanskelige arbeidsforhold for brannvesenet og den store bygningstekniske variasjonen blant eksisterende parkeringskjellere. Muligheter for å bedre tilkomst ved brann- og redningsinnsats bør utredes. Det bør vurderes om dagens bygningstekniske regelverk for parkeringskjellere gir et akseptabelt sikkerhetsnivå for bygg og mennesker.
- Våre anbefalinger:
  - o Inntil det foreligger mer kunnskap om sløkkesetid og redningsinnsats ved elbilbranner i parkeringskjellere, bør sprinkler-/vanntåkeanlegg være et minimumskrav for å tillate parkering av elbiler.
  - o Det bør gjøres en vurdering av om elbiler bør parkeres nær inn-/utkjøring med en definert minimumsavstand mellom hvert kjøretøy.
  - o Det anbefales å tillate parkering av gassbiler i parkeringskjellere som oppfyller bestemte bygningstekniske krav, eksempelvis sprinkler-/vanntåkeanlegg. Gassdeteksjon er hensiktsmessig. Det bør være krav om Ex-sikre elektriske installasjoner.

## Summary in English

### Background

There is an increasing focus on the use of alternative fuels in the transport sector. In Norway, the number of electric vehicles and rechargeable hybrids passed 74,000 in September 2015, the number of gas buses is increasing, and a national goal has been set to increase the number of hydrogen-powered vehicles. These alternative fuels have different fire and explosion characteristics compared to conventional fossil fuels, and potential problems with regard to fire safety, especially in enclosed areas, are not well understood.

### Objectives

This report details potential fire-related problems for electric and gas powered vehicles in enclosed spaces, with focus on underground parking garages. An assessment is made of whether current practices and regulations are sufficient for the prevention of fire-related accidents in enclosed spaces, and whether fire and rescue personnel have knowledge and procedures that enables them to handle such accidents safely. The report cites specific actions that could be considered.

### Method

The information was obtained by searching the literature and news articles, by reviewing regulations and by communicating with relevant stakeholders.

### Conclusions

There is still insufficient knowledge about prevention, and potential consequences, of fire or explosion in electric and gas powered vehicles in enclosed spaces.

Compared with the fire and explosion risk of conventional vehicles, we see the following key challenges with electric and gas powered vehicles in enclosed spaces:

- Electric vehicles:
  - o Potentially long extinguishing time and large water consumption.
  - o Risk of re-ignition after extinguishing.
- Gas powered vehicles:
  - o The risk of safety mechanisms not functioning.
  - o Even small amounts of gas that accumulate in enclosed space can cause an explosion.

Specific issues for parking basements:

- To extinguish a car fire in a parking basement can be challenging, regardless of the fuel type involved. This is due to challenging operational conditions for fire fighters, and a large variety of building specific parameters for existing parking basements. Improved access for fire fighters to parking basements should be considered. It should be assessed whether today's building regulations provide an acceptable safety level for buildings and people.
- Our recommendations:
  - o Until there is more knowledge about extinguishing and rescue efforts in electric vehicle fires in parking basements, a sprinkler / water mist system should be a minimum requirement to allow parking of electric vehicles.
  - o There should be an assessment of whether electric vehicles should be parked close to an entry/exit ramp, with a defined minimum distance between each vehicle.
  - o It is advisable to only allow parking of gas powered cars in parking basements that meet specific building technical requirements, such as a sprinkler / water mist system. Gas detection is also appropriate. There should also be requirements for intrinsically-safe electrical installations.

## Definisjoner og forkortelser

**Alternative energibærere:** Energikilder som har til hensikt å delvis erstatte fossile drivstoffer og bidra til forbedret miljøeffekt i transportsektoren. Eksempler på alternative energibærere i transportsektoren: Elektrisitet, hydrogen, biobrensel, syntetiske og parafinholdige brensler, naturgass (inkludert CNG og LNG) og LPG [1].

**Antennesesenergi:** Minste varme/energi som må til for å kunne antenne et materiale.

**Automatiske parkeringsanlegg:** Parkeringsanlegg der biler avleveres og innebygde mekaniske systemer i anlegget flytter bilene til ledige plasser. Dette er arealeffektivt og gir tett parkering av biler, ofte i flere nivåer i samme rom.

**Biogass:** Biogass dannes ved nedbryting av organisk materiale, regnes som klimanøytralt og er det fornybare alternativet til naturgass. Renset biogass benyttes til drivstoff og består av mer enn 95 % metan. Naturgass og rensset biogass har tilnærmet lik sammensetning.

### Brennbarhetsgrense:

- **Nedre:** Laveste konsentrasjon av brennbar gass/damp som er tilstrekkelig for antennelse med etterfølgende flammeutbredelse gjennom blandingen uten tilførsel av energi utenfra.
- **Øvre:** Den høyeste konsentrasjon av brennbar gass/damp som i luft er mulig for antennelse med etterfølgende flammeutbredelse gjennom blandingen uten tilførsel av energi utenfra.

**Brenselcelle:** En elektrokjemisk enhet som omdanner kjemisk energi til elektrisk energi, varme og reaksjonsprodukter, under tilførsel av drivstoff og oksidasjonsmiddel. Drivstoffet kan være hydrogengass («hydrogencelle»), eller hydrogenholdige, organiske materialer.

**CFD:** *Computational fluid dynamics*. Bruk av numerisk analyse og algoritmer til å visualisere fluiddynamiske prosesser.

**CNG:** *Compressed natural gas* er et petroleumprodukt, hovedsakelig bestående av metan som er trykksatt og lagret på gasstanker.

**Drivstoff:** Energibærende brensel.

**Eksplisjonsgrense:** Se brennbarhetsgrense.

**Elektrisk kjøretøy («elkjøretøy»):** I denne rapporten definerer vi elektriske kjøretøy som kjøretøy med batteridrevne elmotorer (elbil og ladbar hybrid), mens hydrogencellekjøretøy er kategorisert som gasskjøretøy<sup>1</sup>.

**Ex-sikkert utstyr:** Godkjent utstyr for bruk i eksplosjonsfarlige områder.

---

<sup>1</sup> Brenselcellekjøretøy er elektriske biler med batteri som lades fra brenselceller. Dette gir en kombinasjon av de brannrelaterte utfordringene til et elkjøretøy og eksplosjonsrisikoen til et gasskjøretøy, men med et batteri som potensielt kan fungere som en tennkilde. Konsekvensene ved en potensiell hydrogeneksplosjon gjør at hydrogencellekjøretøyet i denne rapporten kategoriseres som et gasskjøretøy.



**Flammepunkt:** Laveste temperatur der et materiale eller produkt avgir tilstrekkelig brennbar gass til å antennes momentant ved eksponering for flamme ved angitte prøvingsbetingelser.

**Forbrenningsmotor:** En maskin der den kjemiske energien i et drivstoff omdannes til mekanisk energi ved forbrenning.

**Fremdriftsteknologi:** Motorteknologien som er brukt i et kjøretøy.

**Gasskjøretøy:** I denne rapporten definerer vi et gasskjøretøy som et kjøretøy som helt eller delvis benytter gass som drivstoff for fremdrift. Dette inkluderer både LPG-, CNG- og hydrogencelledrevne kjøretøy, og også gasshybrider.

**HIAD:** *Hydrogen incident accident database.*

**HRR:** *Heat release rate.* Varmeavgivelse [J/s],

**Hybridkjøretøy:** Kjøretøy som benytter mer enn én form for energi til fremdrift. De vanligste hybridene bruker en kombinasjon av forbrenningsmotor og elektrisitet. Ladbare hybrider er hybride, elektriske kjøretøy med oppladbare batterier, og som benytter ladestasjoner.

**Hydrogencelle:** Brenselcelle som bruker hydrogen som drivstoff.

**Innelukket rom:** Brukes i denne rapporten om en form for innelukkning av brannomgivelsene. Innelukkingen påvirker både brannutvikling og røykspredning, og dermed evakueringsmuligheter, sammenlignet med en brann i åpne omgivelser. Graden av innelukkning er avhengig av rommets konstruksjonsmessige ventilasjonsåpninger. Ventilasjonsanlegg vil kunne kompensere for byggets konstruksjonsmessige innelukkning.

**LNG:** *Liquefied natural gas.*

**LPG:** *Liquefied petroleum gas.* I Norge består LPG av 95 % propan og 5 % butan. LPG som brukes i forbrenningsmotorer omtales ofte som autogass.

**LEL:** *Lower explosive limit.* Nedre eksplosjonsgrense.

**LFL:** *Lower flammability limit.* Nedre brennbarhetsgrense.

**LUT:** Luftutskiftninger per time er antall ganger per time der hele rommets volum blir byttet ut med ny frisk luft fra ventilasjonsanlegget.

**NEK 400:** En samling av standarder som er det sentrale henvisningsgrunnlaget i forskrift om elektriske lavspenningsanlegg for elektriske installasjoner, inkludert ladestasjoner for elektriske biler i bolig og andre bygg.

**NmL/h/L:** Normalvolum per time per lagringsvolum, som er enheten for lekkasjerate.

**Thermal runaway:** Ukontrollert varmeproduksjon som kan oppstå i batterier når temperaturen overstiger en gitt grense (ofte 130 – 200 °C, men avhengig av batterikjemi) Når thermal runaway først er initiert i en battericelle, lar ikke prosessen seg stoppe eller reversere.

**Konvensjonelle drivstoff:** Bensin og diesel.

# Innledning

## 1.1 Bakgrunn

I september 2015 var det mer enn 66.000 elbiler og 8.000 ladbare hybrider på veiene i Norge [2]. Dette er et svært høyt tall, både i forhold til antall elkjøretøy på verdensbasis, og i forhold til totalt antall kjøretøy i Norge. Det er videre anslått at antallet må økes til 200.000 elbiler og ladbare hybrider innen 2020 for å nå myndighetenes mål om maksimale utslipp på 85 g CO<sub>2</sub>/km på den mest kostnadseffektive måten [3]. I tillegg til økningen i antall batteridrevne kjøretøy, er det en økende bruk av gass i busser, og hydrogenceller er også tatt i bruk som fremdriftsteknologi. De alternative energikildene benyttes både i biler, busser og ferjer i Norge.

El og gass som drivstoff har andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn konvensjonelt, fossilt brensel, og fører til nye problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet på veier og i tunneler, i parkeringshus over og under bakken, til sjøs m.m. [4][5][6][7][8][9]. Vi må ta høyde for at det i fremtiden vil være mange kjøretøy med ulike energibærere på veier og i parkeringsfasiliteter, og i de mange tunnelene i Norge vil det ferdes store tankbiler fylt med gass. Hvis ikke forsknings- og kunnskapsnivået følger den raske innfasingen av ulike alternative energibærere i transportsektoren, oppstår usikkerhet med hensyn til brannsikkerheten. 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.

Branner i el- og gasskjøretøy kan kreve andre forebyggende tiltak, andre slokkemetoder, og føre til andre brannscenarier enn branner i konvensjonelle kjøretøy. En brann som involverer elbiler parkert innendørs kan, som følge av lang slokketid, medføre at bygningen blir utsatt for en større brannpåkjenning enn den er dimensjonert for. En brann i en gassbuss kan resultere i en 15 - 20 meter lang jetbrann [10], noe som kan få dramatiske konsekvenser hvis det skjer i nærheten av tett trehusbebyggelse, i nærheten av personer eller i innelukkede rom.

Fortetting i og rundt byer gjør at det er et økende behov for parkeringsplasser under bakken. Dagens parkeringsbygg er konstruert med bakgrunn i erfaringer fra kjøretøy med konvensjonelle drivstoffer, og det er usikkert om byggene er tilstrekkelig sikret mot brannrelaterte hendelser som involverer kjøretøy med nye energibærere. Eksempelvis mangler en stor andel av dagens parkeringsbygg systemer for gassdeteksjon og tilstrekkelig ventilasjon hvis det skulle oppstå en lekkasje fra et gasskjøretøy.

Brannvesenet uttrykker usikkerhet når det gjelder hvordan de skal utføre innsats i situasjoner som involverer alternative energibærere i innelukkede rom, og de har reservert seg mot å gå inn i enkelte parkeringsbygg. Ferjeselskap og eiere av parkeringsbygg praktiserer også varierende restriksjoner med hensyn til hvilke kjøretøy de tillater. Det er derfor viktig å utrede den reelle risikoen, også for å unngå at vurderinger blir for konservative, og dermed legger unødige begrensninger på kjøretøy med alternative energibærere.

Denne rapporten er organisert som følger: Først beskrives utbredelse av typiske drivstoffer i Norge. Deretter ser vi på brann- og eksplosjonssikkerhet for ulike alternative energibærere, og i ulike innelukkede rom som kan inneholde kjøretøy. Som følge av det raskt økende behovet for egnet parkering til kjøretøy med alternative energibærere, haster det med å vurdere om dagens krav til eksisterende og nye garasjeanlegg er tilstrekkelige. Rapporten fokuserer derfor hovedsakelig på parkeringsbygg, men konklusjonene vil likevel til en viss grad være overførbare til andre innelukkede rom. Rapporten avslutter med en diskusjon og gir forslag til hvilke områder det er viktig å rette fokus mot i videre arbeid. El- og gasskjøretøy behandles separat under hvert avsnitt gjennom hele rapporten.

## 1.2 Målsetting

Prosjektet har hatt som målsetting å

- kartlegge brannrelaterte problemstillinger ved el- og gasskjøretøy i innelukkede rom, som eksempelvis parkeringsbygg over og under bakken, tunneler og parkeringsdekk på ferjer
- vurdere om gjeldende praksis og regelverk gir tilstrekkelig forebygging av brannrelaterte ulykker som involverer el- og gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom
- vurdere om brann- og redningsmannskap har tilstrekkelig kunnskap og prosedyrer til å håndtere denne typen ulykker på en sikker måte
- foreslå konkrete tiltak som bør tas opp til vurdering for å ivareta brannsikkerheten

## 1.3 Metode

Informasjon er innhentet ved

- søk i litteratur og nyhetsartikler
- gjennomgang av regelverk
- intervju med Trøndelag brann- og redningstjeneste (TBRT)
- kommunikasjon med flere brannvesen i Norge
- workshop med relevante aktører

## 1.4 Avgrensninger

### 1.4.1 Innelukkede rom

Selv om rapporten beskriver ulike rom med ulik grad av innelukking, har vi valgt å fokusere mest på parkeringskjellere. Dette skyldes at det er mange spørsmål knyttet til om gjeldende regelverk for brannsikkerhet i parkeringskjellere er relevant for det økende antallet kjøretøy med alternative energibærere. Til tross for denne avgrensningen er mange av utfordringene overførbare til andre typer innelukkede rom.

### 1.4.2 Statistikk

Vi har ikke funnet god statistikk på inntrufne hendelser kategorisert ut fra drivstofftype. NFPA utførte i 2012 en studie på bilbranner i USA i perioden 2006 – 2010, basert på the National Fire Incident Reporting System (NFIRS). Studien konkluderte blant annet med at datasystemet ikke gir opplysninger om hendelser i forhold til ulike drivstofftyper, og at slik data uansett ikke vil gi mening inntil det er flere kjøretøy på veiene [11].

### 1.4.3 Risiko

I denne rapporten er vurderinger av risiko basert på litteraturinnsamling og kommunikasjon med aktører, og ikke på bakgrunn av egne eksperimentelle resultater eller beregninger.

Vi har sett på brann- og eksplosjonsrisiko for el- og gasskjøretøy relativt til konvensjonelt drivstoff. Det betyr at vi hovedsakelig påpeker problemstillinger der vi mener det kan være økt risiko ved bruk av alternative energikilder. Det er imidlertid forbundet en viss brann- og eksplosjonsrisiko med alle typer drivstoffer, også konvensjonelle. Det kan derfor være viktige problemstillinger som bør løses uavhengig av type drivstoff.

Når det gjelder gassdrevne kjøretøy, har vi kun vurdert risiko for drivstoffer som er i bruk i kjøretøy. Risikoen ved transportering av drivstoff er ikke behandlet i denne rapporten.

### 1.4.4 Drivstoffkategorier

I denne rapporten beskrives kun de vanligste fremdriftsteknologiene og drivstoffene som benyttes i Norge. Vi forsøker å behandle el- og gasskjøretøy separat. Dette er noe utfordrende, da mange kjøretøy kan plasseres i begge kategoriene, som eksempelvis hybrider og brenselcellekjøretøy. Siden hybrider kan bestå av varierende kombinasjoner av fremdriftsteknologier, omtales de ikke spesielt i denne rapporten. Det er likevel viktig å huske at problemstillinger for el- og gasskjøretøy også er relevante for henholdsvis ladbare hybrider og gasshybrider. Videre har vi valgt å kategorisere hydrogenceller under gasskjøretøy, fordi det er hydrogengassen som er det mest typisk trekket ved kjøretøyet, og som har stor betydning hvis en brann eller eksplosjon skulle oppstå.

Av gassholdige drivstoffer, har vi valgt å fokusere mer på hydrogen enn andre gasser. En årsak til dette er at hydrogen har en renere miljøprofil enn LPG og CNG. Selv om det er flere kjøretøy i dag som benytter LPG enn hydrogenceller, er det et nasjonalt mål å øke antallet kjøretøy med hydrogenceller i årene fremover.

Det er også en nasjonal satsing på biogass i transportsektoren. Biogass er regnet som et klimanøytralt drivstoff og mer miljøvennlig enn CNG. Likevel har biogass og CNG tilnærmet lik sammensetning og like branntekniske egenskaper, og vi beskriver derfor hovedsakelig CNG videre i denne rapporten.

### 1.4.5 Forslag til tiltak

Rapporten gjør ikke en vurdering av gjennomførbarheten av de ulike tiltakene som foreslås. Dette må utføres i egne analyser, for eksempel med fokus på nytte i forhold til kostnader.

## 2 Utbredelse av drivstofftyper i Norge

I transportsektoren regnes alternative drivstoffer som energibærere som kan erstatte konvensjonelle, fossile drivstoffer. I Norge har det vært to typer dominerende, konvensjonelle drivstoffer på markedet; bensin og diesel. På verdensbasis finnes det nå en rekke alternative fremdriftsteknologier for bruk i kjøretøy [12], og flere av disse har etablert seg på det norske markedet. Nærmere beskrivelse av noen av disse finnes i Vedlegg A. Utbredelsen i Norge av ulike drivstoffer for personbiler og busser i perioden 2008 – 2014 er gitt i Vedlegg B, Tabell B-1 og B-2.

### 2.1 Status i dag

Tabell 2-1 viser utbredelsen av drivstoffer for ulike norskregistrerte kjøretøy i 2014.

**Tabell 2-1** Antall registrerte kjøretøy i Norge i 2014, sortert etter drivstofftype\* [13].

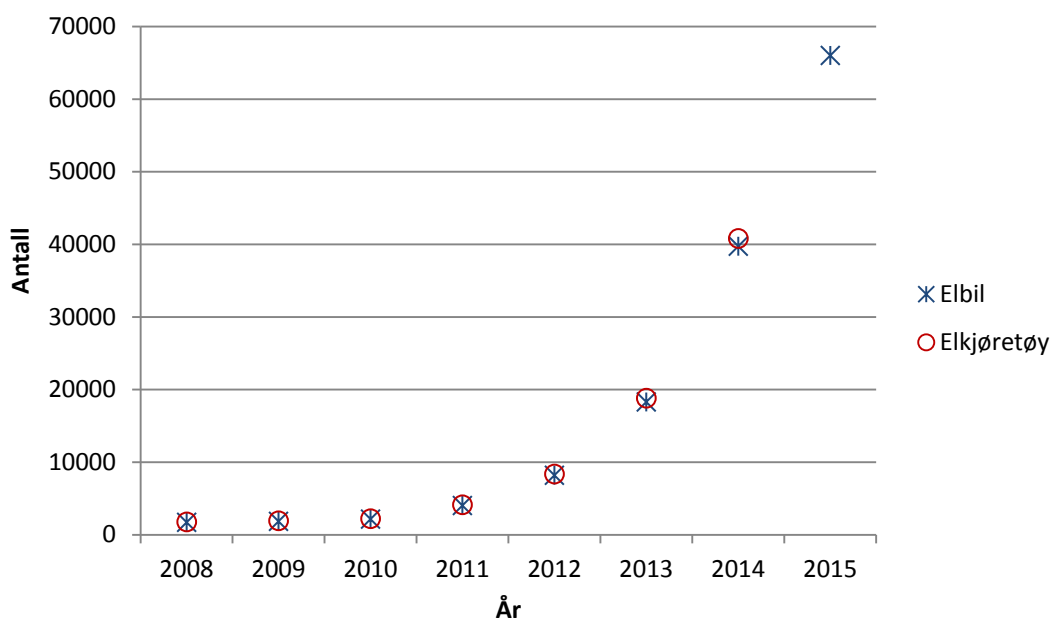
Drivstoff	Personbiler og varebiler		Busser		Lastebiler	
Bensin	1.363.836	45.5 %	421	2.5 %	4.827	6.1 %
Diesel	1.591.263	53.1 %	16.063	93.9 %	73.604	93.6 %
Parafin	19	0.0 %	1	0.0 %	16	0.0 %
Gass	428	0.0 %	565	3.3 %	160	0.2 %
Elektrisitet	39.720	1.3 %	9	0.1 %	2	0.0 %
Annet	1.062	0.0 %	52	0.3 %	59	0.1 %
<b>SUM</b>	<b>2.996.328</b>	<b>100.0 %</b>	<b>17.111</b>	<b>100.0 %</b>	<b>78.668</b>	<b>100.0 %</b>

\* I tabellen er hybridbiler klassifisert etter drivstoffet som brukes til å produsere strøm (opplyst av Statistisk Sentralbyrå per mail, 19. august 2015).

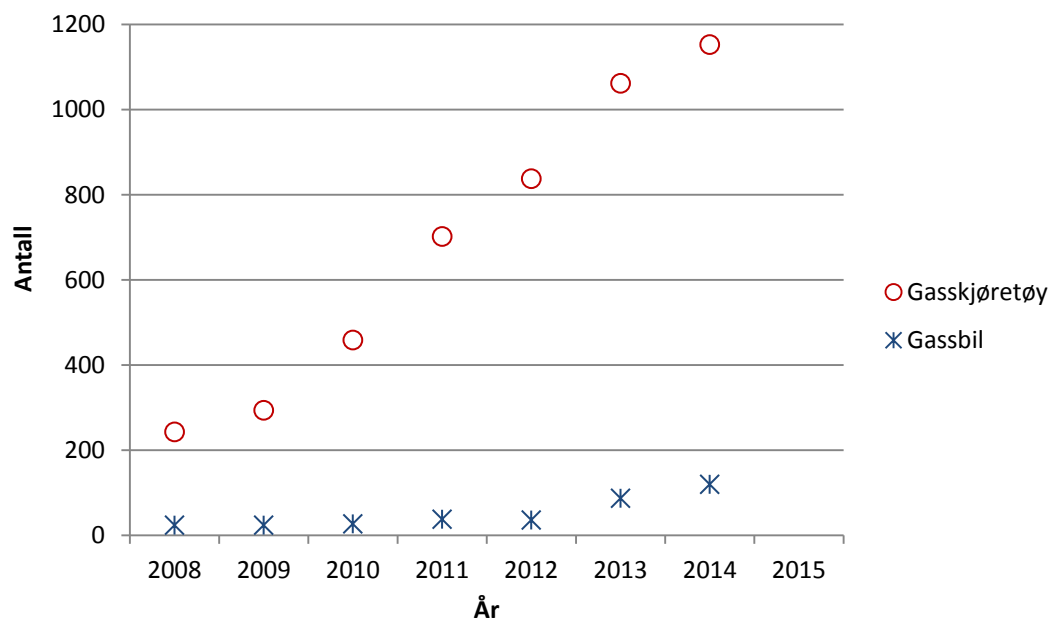
Per desember 2014 fantes det mer enn 712.000 elbiler i verden. Som et resultat av ulike insentiver har Norge raskt fått en elbilpark av betydelig størrelse, med et antall registrerte elbiler som passerte 66.000 i september 2015 [2]. Norge har med dette en elbilletthet som ingen andre land i verden kan måle seg med. De første batteridrevne bussene i Norge ble satt i rute i Stavanger i 2015, og verdens første batteridrevne ferje ble satt i drift over Sognefjorden i januar 2015. Figur 2-1 presenterer utbredelsen av elkjøretøy i Norge i perioden 2008 – 2015, og viser den svært raske økningen i antall elbiler (person- og varebiler). Antallet ladbare hybrider øker også, og var høyere enn 8.000 i september 2015 [2]. Det finnes også flere norske hybride ferjer og skip i drift.

I Norge ble det i 2014 registrert 120 personbiler, 308 varebiler, 565 busser og 160 lastebiler som var gassdrevet [13]. Av totalt tre millioner tilsvarende kjøretøy utgjør dette en relativt liten andel. Vi har ikke klart å finne sikre tall på hva slags type gass kjøretøyene benytter seg av. Det er sannsynlig at det finnes kjøretøy på norske veier som er ombygd til gassdrift uten at dette er registrert, og andelen kan derfor være noe høyere enn hva statistikken tilsier. I desember 2015 var det omtrent 30 personbiler [14] og noen få busser med hydrogenceller i Norge. Det er mange gassferjer i drift i Norge, og flere ferjer benytter hydrogenceller.

Utbredelsen av gasskjøretøy (personbiler, varebiler, lastebiler og busser) i Norge i perioden 2008 – 2014 er vist i Figur 2-2, og det er bussene som bidrar mest økningen i perioden. Hovedandelen av gassbilene går på LPG, mens gassbussene primært går på biogass eller CNG.



**Figur 2-1** Antall registrerte elkjøretøy (personbiler, varebiler, lastebiler og busser) i Norge i perioden 2008 – 2015. Data er hentet fra [13] for 2008 – 2014. Antall for 2015 er hentet fra [2] og gjelder per september måned. Kategorien elbil viser kun antall personbiler, mens kategorien elkjøretøy inkluderer person- og varebiler, busser og lastebiler. Ladbare hybrider er ikke inkludert i statistikken.



**Figur 2-2** Antall registrerte gasskjøretøy (personbiler, varebiler, lastebiler, busser) i Norge i perioden 2008 – 2014 [13]. Kategorien gassbil viser kun antall personbiler, mens kategorien gasskjøretøy inkluderer person- og varebiler, busser og lastebiler. Biler med hydrogenceller er ikke inkludert.

## 2.2 Fremtidig mål og prognoser

I september 2015 ble Norge medlem av den Internasjonale alliansen for lav- og nullutslippsbiler (ZEV Alliance), som har som mål at alle nye biler skal være elbiler, ladbare hybrider eller hydrogenbiler innen 2050 [15][16].

Insentivene for elbiler i Norge er planlagt fjernet frem mot 2020, men det antas likevel en økning i antall elbiler og ladbare hybrider. Norge har ikke vært i front når det gjelder elbusser, men Oslo har nå et mål om at 60 % av bussene skal være batteridrevne innen 2025 [17]. En studie utført av Zero Emission Resource Organisation (ZERO), konkluderte med at nesten halvparten av ferjesambandene i Norge allerede var klare for batteridrift, mens nesten halvparten av de resterende kunne bli aktuelle for batteridrift i fremtiden [18].

En kombinasjon av energibærere vil være nødvendig for å dekke ulike former for transportbehov i fremtiden. Regjeringen har fremlagt en strategi for satsing på biogass i transportsektoren [19]. Hydrogen som energibærer har også mange fordeler [20]. Hydrogengass lages av miljøvennlig energi (sol, vind, vann) og etterlater seg kun vann som restprodukt. HyNor-prosjektet pågikk fra 2003 – 2012, og hadde som målsetting å tilrettelegge for hydrogenceller som fremdriftsteknologi i Norge. HYOP viderefører arbeidet med innfasing av hydrogenkjøretøy i Norge, eier og drifter hydrogenstasjonene, og er også ansvarlig for stasjonen som skal etableres i prosjektet Hydrogen Mobility Europe (H2ME) [21]. NEL og Reitangruppen har annonsert at de skal bygge 20 hydrogenstasjoner i Norge innen 2020 [22]. De største bilprodusentene i verden vil lansere sine modeller for større produksjonsvolum i perioden 2015 – 2017. I dag er det et mål at Oslo-Akershus skal ha 350 hydrogenbiler og 30 hydrogenbusser ved utgangen av 2018, og minst 2.900 hydrogenkjøretøy i 2022. Det er også estimert at Norge kommer til å ha om lag 10.000 hydrogenkjøretøy i 2022 [23]. Videre er det en internasjonal utvikling på hydrogensiden med innføring av store lastebiler, tog og skip med hydrogenceller.

## 3 Brann- og eksplosjonssikkerhet for ulike drivstoffer i kjøretøy

Risikoen for at en brann eller eksplosjon skal oppstå, og at en brann skal spre seg, varierer med ulike drivstoffer. Dette avsnittet beskriver drivstoffenes viktigste branntekniske egenskaper, og sikkerhetssystemene som benyttes i ulike kjøretøy for å forhindre brann og eksplosjon.

De branntekniske egenskapene til et utvalg av konvensjonelle og alternative drivstoffer er oppsummert i Vedlegg C. Person- og bygningsskader som kan oppstå ved ulike eksplosjonstrykk er beskrevet i Vedlegg D.

### 3.1 Fossile drivstoffer

Fossile drivstoffer brukes i flytende form, som også er den formen de lagres i.

Flytende diesel har et relativt høyt flammepunkt ( $> 52\text{ °C}$ ) [24], noe som innebærer at det er vanskelig å antenne diesel. Avdampingen av diesel vil være begrenset, og det er derfor lav sannsynlighet for at det skal skje en eksplosjon. Dersom diesel trykkesett i en beholder og det oppstår en lekkasje, kan antennelse skje ved temperaturer langt under flammepunktet. Kjøretøy har ikke trykksatte dieseltanker, så dette scenariet er ikke relevant ved vanlig transport.

Bensin har et mye lavere flammepunkt ( $< -43\text{ °C}$ ) [24] enn diesel, og antenner mye lettere. I tillegg fordamper bensin raskt, også ved normale utendørstemperaturer. Dersom dampen har mulighet til å samle seg opp, eksempelvis i et innelukket rom, kan det skje en eksplosjon. Bensin er eksplosiv i et blandingsforhold i luft i området 1,4 – 7,6 % [24]. En større bensinlekkasje er derfor å betrakte som en alvorlig situasjon.

Bensindamp som er i likevekt med bensin (væske) vil ha en konsentrasjon som er over den øvre brennbarhetsgrensen, og dermed være vanskelig å antenne. Dette er tilfellet for bensindampen som finnes i en lukket bensintank, gitt at det fortsatt er flytende bensin igjen på tanken, og at temperaturen ikke er veldig lav [25]. Imidlertid vil noe av dampen blande seg med luft ved åpning av bensinlokket, slik at blandingen ved åpningen kan bli antennelig. Til tross for dette er fylling av bensin ansett som relativt trygt, men det forutsetter at det er likevekt mellom bensinen i væske- og i gassfase. Så lenge det er bensin i overskudd, altså ikke helt tom tank, er disse betingelsene oppfylt.

Et større bensinutslipp utendørs vil medføre fare for brann, og kan under visse omstendigheter også føre til eksplosjon. Et innendørs bensinutslipp vil gi en høyere risiko for akkumulering av damp og påfølgende eksplosjon.

### 3.2 Metanol og etanol

Alkoholer er mindre brukt som drivstoff i Norge. Metanol og etanol har flammepunkt på henholdsvis  $11\text{ °C}$  og  $17\text{ °C}$  [24]. Blanding av luft og drivstoff på tanken vil derfor være mulig å antenne, noe som kan utgjøre en fare ved fylling i nærheten av en tennkilde. Alkoholer er vannløselige, og derfor relativt trygge ved ukontrollerte utslipp. Dersom det oppstår søl ved en bilulykke eller ved fylling, kan drivstoffet lett fortynnes med store mengder vann og bli ufarliggjort. Alkoholblandinger med mindre enn 30 % etanol og 40 %



metanol er ikke antenkelige ved temperaturer under 30 °C. Rask fortykning av et utslipp vil redusere risikoen for en eksplosjon [25].

### 3.3 Elkjøretøy

Elkjøretøy (herunder også ladbare hybrider) har komponenter og egenskaper som skiller seg fra konvensjonelle kjøretøy, men det er ulike meninger om det er knyttet større brannrelaterte utfordringer til elkjøretøy. Dette er utredet i flere studier [26][27][28][29].

Brannrisikoen ved bruk av elkjøretøy er hovedsakelig knyttet til brann i batteriet. En batteribrann kan oppstå internt i batteriet, eksempelvis ved kortslutning som følge av mekanisk skade ved kollisjon [27], eller ved oppvarming fra utsiden av batteriet. I denne rapporten beskriver vi hovedsakelig brannrelaterte egenskaper ved litium-ionbatterier, siden det er disse batteriene som oftest brukes i dagens elkjøretøy.

Mer generell beskrivelse av batteriteknologi finnes i Vedlegg A (avsnitt A.1).

#### 3.3.1 Litium-ionbatterier

Under spesielle omstendigheter kan den store mengden lagret kjemisk energi i et litium-ionbatteri gi en kraftig brann som kan være vanskelig å slokke [30]. Batteriene består av flere komponenter som avgir varme ved nedbryting, det kan dannes brennbare gasser, og den hydrokarbonbaserte elektrolytten er brennbar [31]. Ved brann vil elektrolytten medføre at litium-ioncellene oppfører seg fundamental forskjellig fra blysyre-, NiMH- eller NiCAD-celler, der elektrolytten er vannbasert [32]. Ved oppvarming eller intern kortslutning har et fullt oppladet batteri større sannsynlighet for å resultere i thermal runaway, men selv fullt utladede litium-ionceller inneholder kjemisk energi som kan frigjøres som varme og resultere i brann.

*Thermal runaway* [33] er en prosess der temperaturen i et batteri ukontrollert øker kraftig (> 10 °C/min) på grunn av eksoterme reaksjoner. En slik eksoterm reaksjon skjer først når batteriet er opphetet til en viss temperatur. For litium-ionbatterier vil thermal runaway normalt skje i temperaturområdet 130 °C til 200 °C [34]. Nærmere beskrivelse av thermal runaway finnes i Vedlegg E.

For batterier med vannholdig elektrolytt kan oksygenproduksjon skje internt i battericellen ved at vann oksideres. For litium-ionbatterier består elektrolytten av en blanding av ulike organiske løsemidler, og oksygenproduksjon vil kun forekomme i små mengder ved nedbryting av enkelte katodematerialer [35]. Elektrolytten kan antennes internt i batteriet ved at den oksideres av katodematerialet. Samtidig er det ikke nok katodemateriale til at det skjer en fullstendig forbrenning av elektrolytten. Luft utenfra vil derfor bidra til en kraftigere brann ved forbrenning av elektrolytten og andre brennbare komponenter i bilen (plast, tekstiler m.m.)<sup>2</sup>.

En kortslutning vil skje dersom det oppstår en lavmotstands kobling mellom positiv og negativ elektrode. Dette vil tømme batteriet raskt, og føre til en voldsom temperaturøkning, der all elektrisk energi går over til varme. En kortslutning kan oppstå internt i batteriet, i én eller flere celler, dersom det oppstår fysisk kontakt mellom anoden og katoden som følge av kollisjon eller annen mekanisk skade. Kortslutning kan også oppstå på grunn av forurensninger inne i batteriet. I løpet av sekunder vil den lokale kortslutningen føre til

<sup>2</sup> Opplyst av Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) ved muntlig kommunikasjon.

økt temperatur i battericellen. Thermal runaway kan dermed induseres og øke temperaturen ytterligere, noe som igjen kan indusere thermal runaway i naboceller. Dersom et objekt skulle penetrere batteriet, kan det skje en intern kortslutning. Batterier er godt beskyttet for å forhindre dette, men det har likevel oppstått flere branner som følge av ekstern punktering av batteri [36].

Dersom batteriet opplades eller utlades mer enn det er laget for, vil elektroder og strømsamlere kunne skades, noe som kan føre til thermal runaway ved opplading av batteriet [37].

Økt temperatur i et batteri kan gi utslipp av ulike gasser. Det er hovedsakelig brennbare gasser som hydrogengass, karbonmonoksid (CO), karbondioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) og eten (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) som dannes [38][39][40], men det er også påvist små mengder av hydrogenfluorid (HF) som er en svært helseskadelig og korrosiv gass [26]. HF kan dannes ved nedbryting av LiPF<sub>6</sub> [33].

I en teststudie av både batteripakker og biler, ble varmeavgivelse og produksjon av røykgasser sammenlignet mellom elbil<sup>3</sup> og konvensjonell bil. Varmeavgivelsen var relativt lik for begge biltyper, men for elbiler ble det målt en høyere akkumulert mengde HF enn for bilen med forbrenningsmotor [26].

### 3.3.2 Sikkerhetssystemer

Følgende sikkerhetssystemer skal forhindre overoppheting av batterier i elbiler:

- En *termostat* kutter strømmen hvis den interne temperaturen i batteriet blir for høy. Termostaten er innstilt på en maksimaltemperatur som ligger godt under smeltepunktet til metallet og den mekaniske bruddtemperaturen til separatorene.
- En *smeltesikring* brukes som beskyttelse mot thermal runaway. Smeltesikringer er ofte innstilt på å smelte ved en temperatur som ligger 30 – 50 °C høyere enn vanlig driftstemperatur [41].
- Hvis strømmen overstiger en gitt grense vil en *positive temperature coefficient* (PTC) begrense strømmen ved at motstanden øker med temperaturen.
- *Circuit interrupt device* (CID) er en mekanisme som bryter strømkretsen dersom det indre gasstrykket overstiger en grense.
- Noen batterier har også en sikkerhetsventil som ventilerer ut gasser for å hindre trykkoppbygging inne i batteriet.

### 3.3.3 Lading av elbil

Selv om bilen er utstyrt med sikkerhetssystemer, må tilstanden og kapasiteten til det elektriske anlegget vurderes av elektroinstallatør før det monteres uttak for lading av elbil i private garasjer (gjelder også borettslag og sameier). Ved overbelastning av kursen kan det oppstå varmgang og brann. Det samme gjelder ved langvarig høy belastning på vanlig stikkontakt, som normalt bare er beregnet for kortvarig høy belastning. Det er spesielle hensyn som må tas høyde for ved lading av elbiler, og NELFO, DSB, Elbilforeningen og NEK har gått sammen om en veiledning om hvordan ladesystemer kan etableres på en sikker måte. I delnorm 722 i NEK 400:2014 angis krav til ladeuttak og ladestasjoner for elbiler [42].

---

<sup>3</sup> Batteriet som ble benyttet (16,5 kWh) er mindre enn hva man finner i mange av dagens elbiler. Eksempelvis har Tesla et batteri på 85 kWh.

### 3.3.4 Slokking av brann i elkjøretøy

Forsøk og erfaringer fra branner har vist at sprinkleranlegg generelt ikke slukker branner i kjøretøy, men har en avkjølede effekt som begrenser brannspredning [43], forutsatt at det er tilstrekkelig avstand mellom kjøretøyene. Selv om det foreløpig finnes få erfaringer med hvordan slike slokkeanlegg fungerer på elbilbranner, er det sannsynlig at de vil ha omtrent samme effekt som på en vanlig bilbrann, basert på tester som viser at varmeavgivelsen fra en elbilbrann er omtrent den samme som for konvensjonelle biler [26][39]. Disse testene ble imidlertid utført på mindre batterier enn de man typisk finner i de fleste elbiler i dag, og et større batteri vil i mange tilfeller resultere i høyere varmeavgivelse. Varmeavgivelsen fra et batteri er også avhengig av hvor oppladet batteriet er, så et større batteri er derfor ikke ensbetydende med en varmere brann [44].

Å slukke en brann i et elkjøretøy kan være mer utfordrende enn å slukke en brann i et konvensjonelt kjøretøy. Hvis brannmannskap kommer nær nok en bensin- eller dieseldrevet bil, er det relativt lett å slukke brannen med vann. Ved brann i batteriet i en elbil, kan det være vanskelig å nå frem til brannen med vann der det behøves. Batteriet er godt gjemt og har et beskyttende skall rundt seg. I tillegg bør det unngås å bore hull for å komme bedre til, fordi dette kan føre til skade på elektriske ledninger og utstyr, og dermed fare for elektriske sjokk<sup>4</sup> [45]. Det er ellers ikke fare for elektrisk sjokk forbundet med bruk av vann som slokkemiddel [46]. Flere har beskrevet prosedyrer for slokking og redning ved brann i elbil [45][47].

Branntester indikerer at slokking av elbil krever både mer vann og lengre slokkesetid enn en konvensjonell bilbrann. National Fire Protection Association (NFPA) i USA utførte en serie fullskala brann- og slokkesetester på testobjekter som simulerte el- og hybridbiler [40]. Resultatene viste at brannene hadde omtrent samme varmeavgivelse som konvensjonelle bilbranner, men krevde større mengde vann til slokking og mer langvarig slokkeinnsats. Slokking av hybridbilene krevde 1.040 – 4.010 liter vann og en slokkesetid på 15 – 56 min, mens slokking av elbilene krevde 4.410 – 9.990 liter vann og en slokkesetid på 36 – 60 min. Ved branntest av samme type elbilbatteri uten slokking, varte brannen i 1 time og 34 minutter. Til sammenligning slukkes en konvensjonell bilbrann utendørs normalt innen 5 minutter<sup>5</sup>. Hvis brannen skjer innendørs, vil lengre slokkesetid kunne medføre økt røykfylling av rommet.

Slokkevann med tilsats av tensider har i noen forsøk vist seg å være effektivt [48]. Tensider kan endre egenskapene til et slokkemiddel på ulike måter, avhengig av hva som tilsettes. Eksempelvis kan vannet gjøres mer viskøst, slik at den kjølede effekten økes ved at vannet ikke så lett renner bort. Alternativt kan vannets overflatespenning reduseres, slik at den kjølede effekten økes ved at vannet fukter bedre. Ved bruk av CO<sub>2</sub>-apparat kan man oppleve at flammene forsvinner, men brannen vil kunne reantenne fordi den fremdeles både har varme, oksidant og brennbart materiale.

Reantenning av elbilbatteri er et mulig scenario under slokkeinnsats. For å slukke brannen fullstendig, er det nødvendig å kjøle ned batteriet slik at thermal runaway ikke sprer seg til naboliggende celler. Dette kan kreve større mengder vann enn hva som er tilgjengelig i en ordinær brannbil [40]. Hvis brannvesenet ikke har tilstrekkelig vanntilgang, må de vurdere om de skal la bilen brenne ut. I innelukkede rom kan dette medføre langvarig produksjon av varme, røyk og giftige gasser [49].

<sup>4</sup> Elektrisk sjokk er strømgjennomgang i kroppen.

<sup>5</sup> Opplyst av Trøndelag brann- og redningstjeneste (TBRT) ved muntlig kommunikasjon.

Ved slokke- og redningsinnsats i innelukkede rom må brannvesenet raskt kunne konkludere med at det er et batteridrevet kjøretøy som brenner (gjelder også ladbare hybrider), og de må ha gode instruksjoner og trening i hvordan de skal håndtere slike branner [50]. Det er ikke tilstrekkelig kunnskap tilgjengelig om sløkkesid, optimale sløkkemetoder og hvordan batteriet og kjøretøyet optimalt bør behandles etter at brannen er sløkket. Det er eksempelvis ingen gode rutiner for å måle om det er restenergi igjen i batteriet. Faren for reantennning av batteriet etter endt sløkkearbeid har betydning for hvor elbiler som har vært utsatt for brann bør plasseres. I et sløkketforsøk gikk det hele 22 timer før brannen reantente [40].

### 3.3.5 Inntrufne hendelser

Utbredelsen av elbiler har skjedd raskt, og som for andre typer alternative drivstoffer, er foreløpig ikke statistikk på inntrufne branner og årsak til branner godt nok kategorisert med hensyn til drivstofftyper. Vi vet dermed ikke nødvendigvis om en brann har involvert en ombygd el- eller gassbil, en hybrid eller et konvensjonelt kjøretøy. Det er heller ikke særlig relevant om det har vært brann i en elbil som sådan. Hvis ikke batteriet har vært involvert i brannen, men kun interiøret eller eksteriøret, så skiller ikke en elbilbrann seg i nevneverdig grad fra en brann i et konvensjonelt kjøretøy.

Selv om statistikken er mangelfull, har det inntruffet flere hendelser, eksempelvis branner i elbiler og hybrider som følge av lading eller kollisjon. Branner har oppstått både på vei, ferjer og i garasjer [51][52][53][54][55]. En ulykke som skjedde 8. desember 2015 i Østfold omfatter flere av problemstillingene som er nevnt i denne rapporten. En elbil ble påkjørt av toget, og begynte plutselig å brenne to timer senere (Figur 3-1). Brannvesenet rapporterte om uventet lang sløkkesid [56]. Tesla-brannen i januar i 2016 viser at brannvesenet ikke er godt nok kjent med at branner i elbiler skal sløkkes med vann [57].



**Figur 3-1** Brann i elbil oppsto to timer etter kollisjon med tog. Foto: Freddie Larsen.

## 3.4 Gassdrevne kjøretøy

Bensin, diesel, metanol og etanol lagres i væskeform, mens gass lagres i gass- eller væskeform i trykksatte tanker i kjøretøyet. Som følge av trykket i tankene, vil en lekkasje fra et gasskjøretøy arte seg svært forskjellig fra en lekkasje fra et kjøretøy med konvensjonelt drivstoff. Om en lekkasje fra en gasstank resulterer i eksplosjon eller brann, avhenger av antennestidspunkt etter start av utslipp, mengden gass som slippes ut, og om gassen har samlet seg opp. Videre har de ulike gassene forskjellige egenskaper som påvirker brann- og eksplosjonsrisikoen. Generelt medfører en skade på trykksatte tanker en eksplosjonsrisiko. Gasstankene er imidlertid utstyrt med flere sikkerhetssystemer som skal forhindre både overtrykk og lekkasjer, og stenge av gassen ved behov, eksempelvis ved et slangebrudd.

### 3.4.1 Sikkerhetssystemer

Følgende sikkerhetssystemer benyttes i gasskjøretøy:

- Gasstanken er den mest støtsikre komponenten i bilen. Den er plassert langt bak i personbiler, og på taket på busser. Tankene er godt beskyttet ved kollisjon.
- *Avstengingsventiler* stenger gassflaskene dersom det oppstår brudd på en slange, en kraftig kollisjon eller dersom tenningen skrur av.
- Tankene er utstyrt med *sikkerhetsventil* som ved en gitt temperatur åpnes og slipper ut all gassen i tanken. Slik unngår man at trykket i tanken øker utover hva den er designet for. Det kan oppstå to typer feil på sikkerhetsventilen [58][59]:
  - o Type 1 feil: Sikkerhetsventilen løser ikke ut når den skal. Feilen kan oppstå dersom ventilen er blokkert av is eller smuss.
  - o Type 2 feil: Sikkerhetsventilen utløser når den ikke skal. Feilen kan skje som følge av en kollisjon, is eller slitasje på komponenter.

Når sikkerhetsventilen løser ut, oppstår en lekkasje av gass under trykk. Dersom en brennbar gass antennes umiddelbart etter et utslipp, vil det oppstå brann. Størrelsen og intensiteten av brannen avhenger av mengden gass som slippes ut og hvilket trykk tanken har. Brann i en gasslekkasje under høyt trykk kalles en jetbrann. I tillegg til å være veldig varm, har en jetbrann eroderende egenskaper, og kan gjøre stor skade på strukturer som blir eksponert. Til tross for dette, er en jetbrann en mye mer forutsigbar situasjon enn et gassutslipp som ikke er blitt antent.

- For LPG-biler er det viktig at tanken ikke fylles helt opp. Det er derfor montert en *overfyllingsventil* som skal sikre at tanken maksimalt fylles opp til 80 % av full tank. Hensikten er å gi nødvendig plass til ekspansjon av gassen ved økt temperatur.

Sikkerhetssystemene skal kontrolleres ved gitte tidsrom, ved å funksjonsteste ventiler og trykkteste gasstanker.

### 3.4.2 Biogass, CNG og LPG

Biogass og CNG produseres på ulik måte, men består begge hovedsakelig av metan, og har derfor liknende branntekniske egenskaper. Vi presenterer derfor hovedsakelig CNG i den videre teksten.

CNG består hovedsakelig av metan ved et trykk på 20 – 25 MPa (200 – 250 bar) [60], og er lagret i store tanker. CNG har et antennelsesområde mellom 5 og 15 % og

antennelsestemperatur i området 450 – 500 °C. Brann eller eksplosjon kan oppstå ved antennelse av en gasslekkasje som umiddelbart vil danne en antennelig blanding av gass og luft i nærheten av lekkasjen. Gassen vil først ekspandere, avkjøles og synke, for deretter å stige når metanen varmes opp til samme temperatur som omgivelsene. Antennelse krever lav energi, og kan eksempelvis skje ved statisk elektrisitet. CNG er opprinnelig luktfri, men tilsatt luktstoff slik at en lekkasje kan detekteres av personer som befinner seg i nærheten i god tid før antennelse [60].

I Norge er det hovedsakelig busser som bruker biogass og CNG. Bussene frakter med seg store mengder gass, og konsekvensene ved en brann eller en eksplosjon vil derfor kunne bli alvorlige. Det har oppstått et par branner i gassbusser i Norge [61][62], men brannene ble sløkket før gasstankene utløste. I Sverige og i Nederland har det imidlertid vært alvorlige branner i CNG-busser [10][63].

I Seattle i 2007 eksploderte en CNG-bil, og undersøkelser etter ulykken viste at årsaken kunne spores tilbake til en lettere kollisjon tre uker tidligere [64]. Dette understreker at gasskjøretøy som har vært utsatt for mekanisk påkjenning ikke må settes i drift igjen med skadede komponenter.

LPG består hovedsakelig av propan og oppbevares i væskeform ved et moderat trykk på ca. 120 psi (8,3 bar) [60]. LPG er svært flyktig, og har et antennelsesområde mellom 2,1 og 9,5 %, omtrent det samme som for bensin [60]. Den største faren ved LPG-biler er store utslipp fra en skadd tank, utslipp fra slanger ved fylling eller en liten kontinuerlig lekkasje fra systemet. LPG er tyngre enn luft, og vil samle seg opp som en sky nede ved bakken etter et utslipp. En slik gassky vil gjøre stor skade om den blir antent. På samme måte som CNG, er LPG tilsatt et luktstoff som gjør det mulig å detektere en lekkasje. Varmeavgivelsen i *heat release rate* (HRR) fra en LPG-brann er omtrent det dobbelte av en bensinbrann.

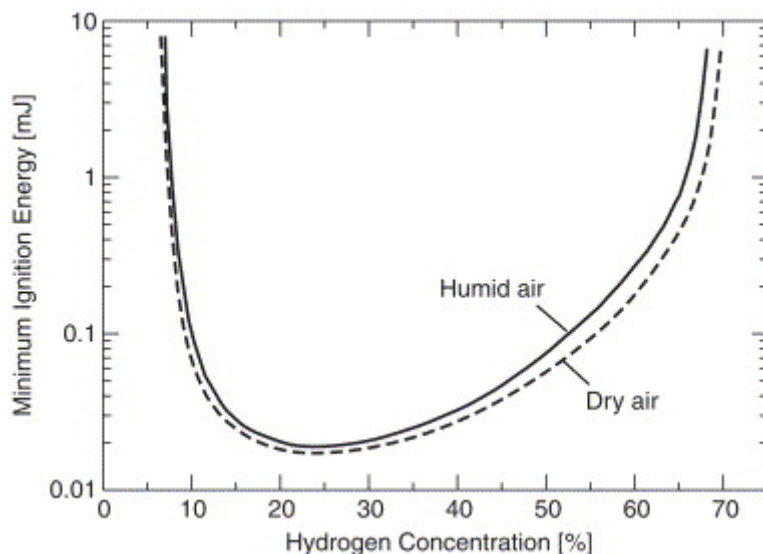
LPG er et svært utbredt drivstoff internasjonalt. Eksplosjoner knyttet til LPG-kjøretøy har hovedsakelig skyldtes overfylling av tanken. En undersøkelse fra USA viste at 17 av 105 biler (16 %) som var involvert i ulykker, hadde ikke-fungerende overfyllingsventiler [65]. Mange av LPG-bilene i Norge er ombygde bensinbiler. Hvis ikke ombyggingen er gjort forskriftsmessig, kan dette påvirke sikkerhetssystemene.

### 3.4.3 Hydrogengass

Antennelsesenergien for hydrogengass er svært lav (0,019 mJ) i forhold til gass av hydrokarboner (ca 0,2 mJ) [60]. Det er altså omtrent 10 ganger lettere å antenne hydrogen- enn hydrokarbongass [25]. Den lave antennelsesenergien kan komme fra en usynlig gnist<sup>6</sup> eller statisk elektrisitet fra en person. I det lave brennbarhetsområdet er antennelsesenergien høyere, og omtrent som for andre brennbare gasser. Antennelsesenergien er på sitt laveste (0,019 mJ) ved 20 – 30 % hydrogenkonsentrasjon, og på sitt høyeste ved ca 10 % og 65 % hydrogenkonsentrasjon. Luftfuktigheten har neglisjerbar innvirkning på antennelsesenergien [66]. Figur 3-2 viser antennelsesenergien for ulike hydrogenkonsentrasjoner i luft.

---

<sup>6</sup> Gnister med varighet ned mot 5 nanosekund (usynlige for det blotte øyet) [66].



**Figur 3-2** Sammenheng mellom hydrogenkonsentrasjon og minste antennelsesenergi i tørr og fuktig luft. Figuren er gjengitt med tillatelse [66].

Hydrogen er gassen med raskest flammehastighet, og har et svært bredt brennbarhetsområde i luft (4 – 75 % [60]). Små utslipp av hydrogen utendørs er sjelden et problem, fordi gassen er flyktig og fortynnes raskt til en ikke-antennelig blanding. Dersom utslipp derimot skjer innendørs i et ikke-ventilert rom, kan det oppstå en eksplosjon. I tillegg til å være svært eksplosiv er hydrogen uten lukt og farge, og en lekkasje er derfor vanskelig å oppdage for mennesker [25].

Den totale energien lagret i en full hydrogentank i en personbil er mindre enn i en full bensintank. Eksempelvis tilsvarer 8 kg hydrogengass varmeenergien til 22 – 24 liter bensin. De fleste bilprodusenter retter seg inn mot en maksimal mengde hydrogen på 5 – 6 kg [67]. Dette innebærer at den totale varmeenergien avgitt fra en brann i en hydrogenbil i mange tilfeller vil være mindre enn for en bensin- eller dieselbil. I personbiler lagres hydrogen i tanker med trykk på 700 bar, mens i busser er det vanlig med tanker på 350 bar. Bussene frakter normalt 40 – 50 kg hydrogen, mens bilene inneholder en mengde på 3 – 10 kg [67]. For busser er gasstankene plassert på taket, og for biler er de plassert i nærheten av bakakslingen. Disse plasseringene er regnet for å være de sikreste for de respektive gruppene av kjøretøy.

Ved flere tilfeller er hydrogengass blitt antent uten at det er avdekket åpenbare tennkilder [68]. Det har skjedd i forbindelse med utslipp, der gassen går fra å være i komprimert til fri tilstand. Dette kan eksempelvis skje når hydrogen ventileres ut av en sikkerhetsventil, eller ved en ukontrollert gasslekkasje. I følge den ideelle gassloven er dette et scenario som får temperaturen til å synke, men hydrogen oppfører seg ikke som en ideell gass under slike forhold. Fenomenet er ikke fullt ut forstått, men man vet at det er spesielle mekanismer som settes i gang når komprimert hydrogen plutselig lekker ut igjennom et rør. Trykkbølgen som oppstår skaper små lokale punkter med forhøyet temperatur. Disse lokale punktene innehar dermed tilstrekkelig energi til å kunne antenne gassen [69]. Flere parametere som trykk, utstrømningshastighet, rørdimensjon m.m. påvirker om dette skjer eller ikke.

I en studie fra 2014 ble det utført tester for å undersøke hvordan en brann i en hydrogenbil med sikkerhetsventil kunne spre seg til et nærstående kjøretøy [70]. Forsøket ble utført med to tettsparkerte hydrogenbiler (0,85 m avstand). I løpet av testen oppstod det en flammeball med 10 meter i diameter ved utløsning av sikkerhetsventilen, som i dette tilfellet pekte oppover. Brannen spredte seg fra den ene bilen til den andre, men det var brannen i interiøret og eksteriøret som medførte spredning, og ikke den brennende,

utventilerte hydrogengassen. Testene ble utført utendørs, og gir ikke informasjon om hvordan brannen ville ha utviklet seg i et innelukket rom.

I en annen studie fra 2014 ble branntester utført på 350 bar hydrogentanker, type 3 og type 4 (se Vedlegg A, Tabell A-1) med frakoblede sikkerhetsventiler [71]. Tankene gikk i luften etter henholdsvis 12:18 [min:sek] og 6:27 [min:sek]. Trykkbølgen fra eksplosjonene var kraftig nok til å ødelegge trommehinner på 16 meters hold og knuse vinduer på 23 meters avstand (se Vedlegg D). Samtidig ble det dannet en ildkule med en diameter opptil 24 m og en flammeemissivitet på ca. 340 kW/m<sup>2</sup>. En studie fra 2010 viste at sikkerhetsventiler som baserer seg på temperatur er lite effektive dersom tanken varmes opp av en punktkilde, for eksempel en stikkflamme som kun varmer opp en del av tanken [64]. Disse testene ble utført utendørs, og verdiene er forventet å være høyere for et innelukket rom.

Hydrogengassmolekylet er så lite at det kan lekke ut av de fleste materialer som er tette for andre brennbare gasser («bakgrunnslekkasje»). Bakgrunnslekkasjen fra en hydrogentank øker med økt lagringstrykk, materialtemperatur og tid (aldring av materialet i tanken) [67]. Materialtemperaturen påvirkes hovedsakelig av omgivelsestemperaturen, og ved termodynamiske prosesser som oppstår under fylling av tanken. Maksimal materialtemperatur er satt til 85 °C ved normal bruk. Hurtig fylling av tanken kan føre til temperaturer over 85 °C, men tester har vist at temperaturen synker til under 50 °C innen et par minutter [67]. I Norge er lufttemperaturen så lav at det ikke er fare for overoppheting av hydrogentankene ved fylling.

Lekkasjeraten gjennom tanker av type 1, 2 og 3 (se Vedlegg A, Tabell A-1) anses å være neglisjerbar. For type 4-tanker kan lekkasjeraten imidlertid utgjøre et problem [72]. Alle type 4-tanker som skal selges må imidlertid gjennomgå en rekke tester. Blant annet testes lekkasje gjennom tanken i 500 timer, basert på en antagelse om at en normal privat garasje har en naturlig ventilasjon på minimum 0,03 LUT [73].

Den franske kommisjonen for atomenergi og fornybar energi (CEA) har utført tester med gass i garasjer med geometri tilsvarende små, private garasjer (5,8 m × 3,0 m × 2,4 m). Resultatene viste at bakgrunnslekkasjen fra hydrogentanker i en naturlig ventilert garasje ikke er tilstrekkelig til at det oppstår en eksplosiv gassblanding. Dersom det imidlertid skulle oppstå en ytterligere lekkasje (ikke bakgrunnslekkasje), kan selv små lekkasjerater (1 liter/min) føre til en eksplosiv gassblanding dersom dette pågår over tid [67][72].

Siden hydrogenbiler ennå ikke er utbredt på markedet, er det ikke tilstrekkelig kunnskap om hvordan kvaliteten på gasstanker og sikkerhetsutstyr forringes etter mange års bruk, men det er antatt at gasstanker vil lekke mer når de blir eldre [67].

### **Inntrufne hendelser**

*HIAD (Hydrogen incident accident database)*<sup>7</sup> er en webdatabase hvor uønskede hendelser knyttet til hydrogen er innrapportert, og informasjonen deles på tvers av landegrensene.

*Hydrogen tools*<sup>8</sup> er en nettside med hovedfokus på erfaringer fra uønskede hendelser. Hittil er de fleste rapporterte hendelsene knyttet til hydrogen i industri og laboratorier. Når hydrogen etter hvert blir mer vanlig i privat bruk, vil databasen kunne fange opp farlige hendelser som også involverer kjøretøy.

<sup>7</sup> Webside: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/>

<sup>8</sup> Webside: <https://h2tools.org/>



I HIAD er det siden år 2000 er det registrert totalt 143 uønskede hendelser, der 434 personer har blitt direkte påvirket av dette. 23 av de 143 ulykkene har ført til 245 personskader, og 14 av de 23 ulykkene har i tillegg vært dødsulykker, der tilsammen 61 personer har omkommet. Det høye antallet skadde og omkomne viser at ulykker som involverer hydrogen-gass kan ha store konsekvenser. Det må nevnes at i de største ulykkene var store hydrogen-tankbiler involvert. Slike tankbiler inneholder mye større mengder hydrogen enn personbiler med hydrogenceller.

### Hydrogenprosjekter

HySafe (the European Network of Excellence on Hydrogen Safety) jobber for sikker innfasing av hydrogenteknologi. HySafe identifiserte blant annet at hydrogenkjøretøy i tunneler bør få spesielt fokus, og opprettet i den anledning prosjektet HyTunnel [74]. HyTunnel avdekket at hydrogenkjøretøy ikke utgjør høyere risiko ved normal bruk enn kjøretøy drevet av CNG eller konvensjonelle drivstoffer, men at mer forskning er nødvendig. InsHyde (Hydrogen Releases in Confined and Partially Confined Spaces) var et annet prosjekt under HySafe, som ble opprettet på bakgrunn av at selv små utslipp av hydrogen i innelukkede rom representerer en alvorlig risiko [68].

## 3.4.4 Brannrisiko ved gasskjøretøy i innelukkede rom

Potensielle risikofylte scenarier i, eller i nærheten av, gasskjøretøy i innelukkede rom, skiller seg fra scenarier der konvensjonelle kjøretøy er involvert. Flere typer gasser er usynlige og avgir ikke lukt, og det kan dermed være vanskelig å oppdage lekkasje og akkumulering av gass som potensielt kan antenne. Eksplosjonsfaren medfører at brannvesenet i enkelte tilfeller reserverer seg mot å utføre slokkearbeid i bygninger som inneholder gasskjøretøy.

Flere faktorer vil påvirke konsekvensene av en gasslekkasje i innelukkede rom:

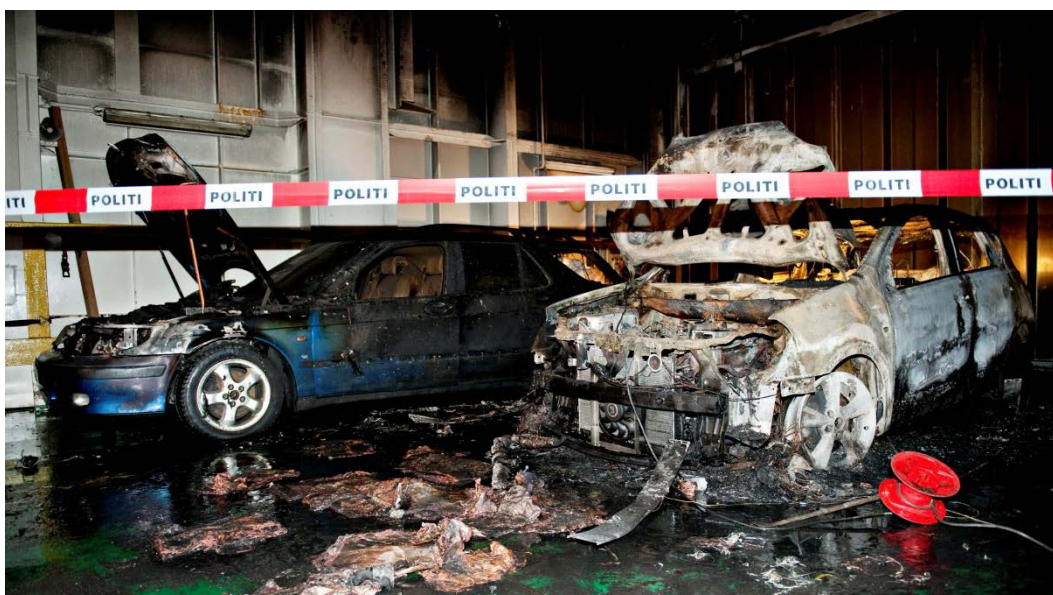
- Ved skade på gasstanken er utslippet ukontrollert og kan variere i størrelse. Størrelsen på utslippet kan påvirke graden av akkumulering av gassen, og dermed risikoen for brann og eksplosjon, med påfølgende konsekvenser.
- Plassering av ventilasjonssystem og ventilasjonshastigheter vil påvirke graden av akkumulering av gassen.
- Hvis det er tennkilder i nærheten, vil gassen kunne antennes.

Brann i et gasskjøretøy vil kunne gi økt trykk i tankene slik at sikkerhetsventilen løser ut. En jetbrann som dannes i utventilert gass vil være svært intens og eroderende, og kunne ha en flammelengde på 15 – 20 meter [10]. Retningen til jetflammen avhenger av plasseringen av sikkerhetsventilen. Plasseringen er ikke standardisert og kan dermed variere for ulike kjøretøy. Hvis jetflammen peker i en forutsigbar retning og ikke treffer brennbar materiale, er situasjonen oversiktlig. Dersom hendelsen skjer utendørs, vil mye av varmen ledes vekk fra bilen. Situasjonen er mindre forutsigbar hvis en jetbrann oppstår fra et kjøretøy som befinner seg i et innelukket rom, der jetflammen kan treffe brennbar materiale. Et hypotetisk scenario er at en jetflamme som peker opp fra taket på en buss inne i en tunnel vil kunne ledes tilbake fra tunneltaket til bussen, og i verste fall skade gasstankene og medføre eksplosjon.

### 3.5 Ombygde kjøretøy

Det finnes både ombygde el- og gasskjøretøy i Norge, noe som gir utfordringer både for registrering av kjøretøy og kategorisering av kjøretøy med hensyn til drivstoffer. For brannvesenet kan dette skape usikkerhet ved at de kanskje ikke har riktig kunnskap om kjøretøyet ved innsats.

Dagens LPG-biler i Norge er ofte ombygde bensinbiler. Flere bensindrevne biler er også ombygd til elbiler, og det er også mulig å endre batterikjemi i elbiler. Dette er et komplisert arbeid som ufaglærte ikke bør utføre. Ombygging eller vedlikehold som ikke er forskriftsmessig utført, kan påvirke sikkerhetssystemene negativt. I 2010 var en ombygd elbil årsak til brannen på ferjen «Pearl of Scandinavia» [75][76] (Figur 3-3).



**Figur 3-3** København, Danmark 17. november 2010. Brann ombord i passasjerfergen «Pearl of Scandinavia» tilhørende DFDS Seaways. En elbil (den lyse bilen på bildet) som var bygget om fra vanlig bil begynte å brenne mens den ladet. Foto: Eivind Griffith Brønde, VG.

Kjøretøyforskriften stiller krav til registrering ved ombygging av biler og endring av batteriteknologi. Registrering skjer ved at eier fremlegger dokumentasjon fra godkjent verksted om hvilke endringer som er gjort. Bilen kontrolleres deretter hos Statens vegvesen. Det er bileiers ansvar å sørge for at dette blir gjort. Hvis det ikke er utført, skal det i utgangspunktet fanges opp på EU-kontroller. Ombygde kjøretøy registreres imidlertid kun som en merknad i kjøretøyregisteret, og ombyggingen kan derfor være vanskelig å fange opp. Erfaringer tilsier at ombygde kjøretøy har kjørt på veiene i flere år uten å ha blitt omregistrert. Registrerte gassbiler blir kalt inn hvert femte år for kontroll av gassystemet. Oppfølging og kontroll av gassystemet etter en ulykke som involverer gasskjøretøy, er imidlertid eiers ansvar.

## 4 Brannutvikling i innelukkede rom

Det finnes ulike typer innelukkede rom. Et fellestrekk er at en brann eller eksplosjon i et innelukket rom vil møte strukturelle hindringer som, avhengig av graden av innelukking, påvirker både temperatur- og røykutvikling, turbulens og trykk.

En brann i et innelukket rom skiller seg lite fra et utendørs brannscenario i tidlig fase. Etter hvert vil imidlertid brannene kunne utvikle seg svært forskjellig. Følgende er viktige forskjeller mellom en innelukket og en utendørs brann:

- Dersom det ikke er tilstrekkelig oksygentilgang (inkludert luft fra ventilasjonsanlegg) til å brenne alt tilgjengelig brennbar materiale, vil brannen begrenses, og man får en ventilasjonskontrollert brann.
- Når brannen når et stadium der røyklaget har en temperatur på rundt 500 °C, bidrar varmestrålingen fra røyklaget til at den totale varmeavgivelsen blir høyere fra en innelukket enn en utendørs brann, og ofte dobbelt så stor ved overtenning.

Røyken som akkumuleres ved brann i innelukkede rom gjør evakuering utfordrende. Mennesker opplever at det er krevende å evakuere dersom røyktemperaturen er over 50 °C eller CO-konsentrasjon over 700 ppm. I en studie ble det, på bakgrunn av disse verdiene, beregnet at evakuering av mennesker må skje innen 12 minutter hvis det brenner i en større (1200 m<sup>3</sup>) parkeringskjeller [77].

Ved lekkasje av brennbar gass i et område vil det dannes soner som inneholder gass og luft i brennbar konsentrasjon. Dersom gassen antennes vil det foregå en rask forbrenning, der flammene vil forplante seg gjennom gasskyen, og i store gasskyer vil flammene kunne akselerere opp til eksplosjon. Det som påvirker eksplosjonsovertrykket og skadepotensialet til en eksplosjon, er størrelsen på gasskyen, graden av innelukking og hindringer i strømningsbanen. En eksplosjon er altså mer sannsynlig i et innelukket rom enn utendørs.

Forholdsregler som kan bidra til å *redusere risiko* for brann- og eksplosjon i innelukkede rom:

- Begrense tilgangen til brennbar og eksplosivt materiale  
Det kan vurderes hvilke kjøretøy som skal tillates i rommet, og det kan gjøres bygningstekniske tiltak, som eksempelvis seksjonering.
- Redusere risiko for lekkasje av drivstoffer  
Risikoen for lekkasje av brann- og eksplosjonsfarlige stoffer varierer for kjøretøy med ulike drivstoffer, og er nærmere beskrevet i avsnitt 3.
- Redusere risiko for antenne  
Potensielle tennkilder er elektriske installasjoner i bygningen, elektriske kretser og komponenter i kjøretøyet, varmeinstallasjoner eller oppvarmede deler av kjøretøyet (eksempelvis ved at motoren ikke slås av), sigarettglør m.m.
- Forhindre akkumulering av væske eller gass fra lekkasjer  
Eksempelvis bør bygget ha egnet drenering og ventilasjonssystem. I tillegg bør det finnes systemer for tidlig deteksjon av lekkasjer.

Forholdsregler som kan bidra til å *forhindre spredning og redusere konsekvenser* ved brann- og eksplosjon i innelukket rom:

- Redusere videre tilgang til brennbar og eksplosivt materiale
- Ha effektive installasjoner for avkjøling og slokking  
Et sprinkler-/vanntåkeanlegg kan bidra til å slukke eller avkjøle en brann, men kan også medføre dårligere sikt for brannvesenet, fordi lagdelingen av røyken fjernes.<sup>9</sup> En studie viste at sprinkling kan ha positiv eller negativ innvirkning ved et eventuelt gassutslipp i parkeringskjellere. Vanndråpene fra et sprinkleranlegg

<sup>9</sup> Lagdeling av røyk er ikke relevant for lange tunneler.

kan bidra til å blande luften bedre. Dersom det skjer et lite gassutslipp, vil sprinkling kunne være et godt tiltak som fører til at gasskonsentrasjonen tynnes ut til en konsentrasjon som ligger under nedre eksplosjonsgrense. Hvis det derimot skjer et stort utslipp, kan en slik fortykning bidra til at en større del av rommet plutselig blir fylt med en eksplosiv blanding, og dermed forverre situasjonen [78].

- Sikre god tilkomst for brannvesenet og gode betingelser for evakuering
  - Utføre tiltak knyttet til bygningsstruktur
- Eksempelvis øke bygningsmaterialers brannmotstand, seksjonering av arealer, flere trykkavlastningsflater m.m.

Dette avsnittet gir videre en kort beskrivelse av brann- og eksplosjonsrelaterte problemstillinger som er aktuelle i ulike typer innelukkede rom, med hovedfokus på parkeringsbygg.

## 4.1 Parkeringsbygg

Regelverket for prosjektering av parkeringsbygg er basert på erfaringer fra kjøretøy med konvensjonelle drivstoffer og tradisjonelle parkeringshus. Tendensen går mot mer innebygde parkeringsbygg, noe som kan gi varmere branner. Enkelte moderne, automatiske parkeringsanlegg<sup>10</sup> stabler også kjøretøy i høyden [79]. Bekymringen med denne typen parkering, er at brannbelastningen kan øke opptil fire ganger og at spredning til nærtstående kjøretøy blir mer sannsynlig [43].

Eksisterende parkeringsbygg varierer både med hensyn til størrelse, hvordan de er utformet (smal eller bred geometri m.m.), og i hvilken grad de er utrustet med vifter og sprinkleranlegg. Hvor mange personer som til enhver tid befinner seg i et parkeringsbygg vil også kunne variere, både med tid på døgnet og hvilken virksomhet parkeringsbygget tilhører. En garasje tilknyttet et kjøpesenter vil eksempelvis ha større gjennomstrømming av mennesker enn en garasje tilknyttet en boligblokk. Om en brann vil medføre direkte fare for personer, vil avhenge av antallet personer som befinner seg i anlegget når brannen starter, hvordan brannen utvikler seg, hvor raskt sikten blir dårligere, og hvor langt det er til nærmeste nødutgang.

Brannspredning i både parkeringsbygg over og under bakken avhenger av byggets geometri, avstand mellom kjøretøy og takhøyde. En brann i et kjøretøy vil i startfasen være relativt lik i parkeringsbygg over bakken og i en parkeringskjeller. Som følge av god ventilasjon via åpninger i parkeringsbygg over bakken, vil ikke lufttilførselen være en like begrensende faktor for hvor stor brannen etter hvert kan bli, og brannen kan spre seg ut av åpninger og til overliggende etasjer. På den annen side er det generelt bedre evakueringsmuligheter i et parkeringsbygg over bakken enn i en parkeringskjeller. En brann i en parkeringskjeller kan føre til omfattende røykskader på andre kjøretøy, selv om brannen i seg selv er begrenset. I 2013 i Helsingborg, Sverige, spredte en brann i en elbil seg videre til to andre biler. Det tok om lag to timer å få slokket brannen, og 75 biler ble sot- og røykskadet [80]. Elbil Sverige meldte at bilen var av eldre modell med nikkel-kadmium batterier som avga hydrogengass ved lading [81].

Det er generelt utfordrende for brannvesenet å utføre slukkeinnsats i parkeringskjellere. Det er derfor nødvendig å stille spørsmålsteget ved dagens sikring av parkeringskjellere, uavhengig av type drivstoff, fordi anleggene øker i størrelse, utbredelse og kompleksitet. Bygningsstrukturen i et parkeringsbygg er dimensjonert til å motstå brann i en gitt periode (se avsnitt 4.1.2). Dersom en brann varer lenger enn hva bygningsstrukturen kan

<sup>10</sup> Parkeringsanlegg der biler avleveres, og innebygde mekaniske systemer i anlegget flytter bilene til ledige plasser. Dette er arealeffektivt og gir tett parkering av biler, ofte i flere nivåer i samme rom.

tåle, kan brannen spre seg ut av bygningen, og det kan være fare for at hele eller deler av bygningen faller sammen. Bygningen kan også ta skade dersom det oppstår en eksplosjon som følge av en gasslekkasje. En CFD-analyse viste at en eksplosjon etter en gasslekkasje fra en 70 liter LPG-tank i en parkeringskjeller kunne føre til et overtrykk på omtrent 0,3 bar [82]. Ventilasjonshastigheten for å effektivt fortynne en slik gasslekkasje ble funnet til å være  $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$ . Det tilsvarer ca. 100 LUT, noe som i stor grad overstiger ventilasjonskapasiteten i parkeringsbygg.

En studie fra 2011 kartla bilbranner i parkeringsbygg i New Zealand for perioden 1995 – 2003 [43]. Hovedårsaker til brannene var elektriske feil og ildspåsettelse. Brannspredning oppsto kun i de mest innelukkede garasjene. Studien refererer videre til medieoppslag som indikerer at branner i parkeringsbygg i økende grad medfører spredning og involverer et større antall kjøretøy. Med referanse til eksisterende litteratur og tester, oppsummerer studien følgende [43]:

- Det er en økning i varmeavgivelse (HRR) fra 4 MW (gamle kjøretøy) til 8 MW (nye kjøretøy).
- Mengden brennbart materiale i kjøretøy har økt fra 9 kg til 90 kg<sup>11</sup>.
- Branner kan gi strukturelle skader som følge av økte temperaturer ved brann i parkeringsbygg uten tilstrekkelig ventilasjon.
- Det er en større sannsynlighet for spredning av brann, som følge av mer innelukking og stabling av biler.
- Sprinkling er vist å være hensiktsmessig i innelukkede parkeringsbygg fordi risikoen for brannspredning reduseres.
- Sprinkling er effektivt for begrenning av brannen, men ikke nødvendigvis for slokking.
- Sprinkling kan medføre store mengder damp som potensielt hindrer sikt for brannvesenet og evakuerende.
- For stablesystemer er det vist at brann lett kan spre seg fra nedre til øvre bil, også før sprinkler nødvendigvis blir aktivert og kan begrense videre spredning av brannen.

I avhandlingen “Multiple vehicle design fire scenarios in car parking buildings” fra New Zealand (2015) beskrives metoder for risikoanalyse av kjøretøy i parkeringsbygg. Rapporten inkluderer kun diesel og bensin, og konkluderer med at det bør utføres tilsvarende arbeid for alternative energibærere [83].

#### 4.1.1 Norske krav og anbefalinger til oppbevaring av gass

I Norge skiller ikke gjeldende regelverk for parkeringsbygg mellom kjøretøy med ulike drivstofftyper. Imidlertid beskriver regelverket hvilke mengder brannfarlig væske og gass privatpersoner har lov til å oppbevare, og på hvilken måte stoffene skal oppbevares [84].

Fra *Forskrift om håndtering av farlig stoff*, § 6 [84]:

**§ 6. Maksimal tillatt oppbevaring i visse typer av objekt**

I boenhet kan det oppbevares inntil 55 liter brannfarlig gass kategori 1 og 2 og inntil 10 liter brannfarlig væske kategori 1 og 2.

I garasje, i utvendig bod, båthus eller lignende kan det for personlig bruk oppbevares inntil 90 liter brannfarlig gass kategori 1 og 2 og inntil 50 liter brannfarlig væske kategori 1 og 2.

I serveringssted, i overnattingssted og i forsamlingslokale er det ikke tillatt å oppbevare brannfarlig gass kategori 1 og 2, med mindre særskilte tiltak er iverksatt.

<sup>11</sup> Dette skyldes en større bruk av plastkomponenter i nyere biler.

Fra Temaveiledningen om bruk av farlig stoff, kapittel 15 [85]:

**15.2.5 Plassering av gassflasker inne i boenhet**

Skal ikke oppbevares på lavpunkt som kjeller eller annet rom under terreng, på loft, i fyrrom, i elektrisk sentral, nedgang til slike rom eller ved sluk.

Følgende er hentet fra §11-5 Sikkerhet ved eksplosjon, i TEK 10 [86], og er relevant for bygninger der det oppbevares stoffer som medfører en risiko for 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.

## 4.1.2 Norske krav og anbefalinger til parkeringsbygg

### Normalventilasjon (klima- og eksosventilasjon)

Funksjonen til normalventilasjon er å sørge for godt inneklima, ikke å ventilere ut røyk ved en 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 [87]:

- Garasje for langtidsparkering: 3 m<sup>3</sup>/time per m<sup>2</sup> bruttoareal.
- Garasje for korttidsparkering: 6 m<sup>3</sup>/time per m<sup>2</sup> bruttoareal.

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

### Røykventilasjon og tilrettelegging for rednings- og slokkeinnsats

I VTEK 10 [87] stilles det ekstra krav til ventilasjon i parkeringskjellere over en viss størrelse, for å tilrettelegge for eventuell slokke- og redningsinnsats.

§11-17 *Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap* oppgir blant annet følgende preaksepterte ytelser for parkeringskjellere:

- I parkeringskjellere som har bruttoareal mindre enn 400 m<sup>2</sup> eller automatisk slokkeanlegg, er det tilstrekkelig med normalventilasjon.
- Parkeringskjellere uten automatisk slokkeanlegg og med bruttoareal større enn 400 m<sup>2</sup> må ha røykventilasjon.
- Mekanisk røykventilasjon må ha ventilasjonsretning vekk fra inn- og utkjøringsrampe til parkeringskjelleren, og til røykutkast i motsatt ende av rommet.
- Røykventilasjonen må dimensjoneres slik at det, i alle deler av rommet, oppnås en lufthastighet som hindrer tilbakestrømming av brannrøyk, normalt minst 1 m/s.
- Antall og plassering av brannvesenets angrepsveier til parkeringskjeller må være slik at alle deler av parkeringskjelleren kan nås med maksimalt 50 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.

I §11-17 er det pekt på at røykventilasjon må dimensjoneres slik at det oppnås en lufthastighet (normalt minst 1,0 m/s) i alle deler av rommet for å hindre tilbakestrømning av brannrøyk.

I en studie ble det konkludert med at 1,0 m/s ikke er tilstrekkelig for å forhindre tilbakestrømning av røyk [88], og det ble anbefalt at VTEK 10 ikke bør angi en ventilasjonshastighet, men i stedet en bestemt avstand som røyk tillates å strømme mot ventilasjonsretningen.

Et automatisk garasjeanlegg er et lukket og kompakt anlegg som ikke er tilgjengelig for publikum. I automatiske parkeringsanlegg vil ikke røykdykkerinnsats kunne gjennomføres uten vesentlig fare for rednings- og slokkemannskap. Følgende preaksepterte ytelser gjelder for automatiske parkeringsanlegg i henhold til §11-17:

1. Automatiske parkeringsanlegg må ha egnet automatisk slokkeanlegg med minst 60 minutters operasjonstid.
2. Tilgjengeligheten og tilrettelegging for slokkemannskaper må avklares med brannvesenet i hvert enkelt tilfelle.

### Krav til brannmotstand

Alle bygg skal for en viss periode i brann bevare sin integritet. Ifølge VTEK 10 §11-7 gjelder Tabell 4-1 og Tabell 4-2 [87]:

**Tabell 4-1** Størrelse på brannseksjon.

Spesifikk brannenergi MJ/m <sup>2</sup>	Største bruttoareal i m <sup>2</sup> pr. etasje uten seksjonering			
	Normalt	Med brannalarmanlegg	Med sprinkleranlegg	Med røykventilasjon
Over 400	800	1.200	5.000	Uegnet
50 – 400	1.200	1.800	10.000	4.000
Under 50	1.800	2.700	Ubegrenset	10.000

**Tabell 4-2** Brannmotstand for seksjoneringsvegg.

Byggverkets brannklasse	Seksjoneringsveggenes brannmotstand avhengig av spesifikk brannenergi MJ/m <sup>2</sup>		
	Under 400	400-600	600-800
Brannklasse 1	REI 90-M A2-s1,d0 [A 90]	REI 120-M A2-s1,d0 [A120]	REI 180-M A2-s1,d0 [A 180]
Brannklasse 2 og 3	REI 120-M A2-s1,d0 [A 120]	REI 180-M A2-s1,d0 [A180]	REI 240-M A2-s1,d0 [A 240]

Parkeringskjellere blir normalt vurdert til å ha en spesifikk brannenergi på mellom 50 - 400 MJ/m<sup>2</sup>. En studie bekreftet at for eldre biler er dette anslaget sannsynlig [43]. For nyere biler og i automatiske parkeringsanlegg, og spesielt ved stabling av biler i høyden, bør det imidlertid undersøkes nærmere om denne klassifiseringen er gyldig. Tabell 4-1 og Tabell 4-2 gir at det i hovedsak er arealgrensene 1800 m<sup>2</sup> og 10 000 m<sup>2</sup> som benyttes som yttergrenser. For en parkeringskjeller er det tillatt å bygge opptil 1800 m<sup>2</sup> med kun brannalarmanlegg. For større arealer kreves det enten røykventilering (opp til 4000 m<sup>2</sup>) eller sprinkleranlegg (opp til 10 000 m<sup>2</sup>).

I tillegg må alle garasjer > 400 m<sup>2</sup> være skilt fra resten av byggverket med konstruksjoner med en brannmotstand på minst EI90 A2-s1,d0 (§11-8 i VTEK 10).

Større parkeringskjellere og parkeringshus med to eller flere etasjer blir vurdert som brannklasse 2 og det kreves da REI 120-M A2-s1,d0 [A 120]. I praksis betyr dette at en brann ikke skal kunne spre seg til en annen branncelle i løpet av 120 minutter.

### 4.1.3 Krav og anbefalinger i andre land

Det er ulik praksis i ulike land når det gjelder å tillate gassbiler i parkeringsbygg. I flere parkeringsbygg i Europa er det innført forbud mot parkering av LPG-biler [89]. Kravene til parkeringskjellere varierer også, og her følger en oppsummering av regelverk og anbefalinger fra noen utvalgte land. Teksten er gjengitt fra [90]:

#### Tyskland

- Parkeringskjellere større enn 1.000 m<sup>2</sup> skal ha termisk<sup>12</sup> eller mekanisk røykventilasjon:
  - o Termisk røykventilasjon:
    - Minst 0,1 m<sup>2</sup> utluftsareal tilknyttet hver biloppstillingsplass.
    - Maksimalt 20 meter fra hver biloppstillingsplass til nærmeste utluftsåpning.
  - o Mekanisk røykventilasjon (uten sprinkler):
    - Minst 10 luftutskiftninger per time.
    - Ventilasjonssystemet skal være beskyttet mot brann i minst 30 minutter.
  - o Mekanisk røykventilasjon (med sprinkler):
    - 16 m<sup>3</sup>/time per m<sup>2</sup> gulvflate i parkeringskjelleren.
- Maksimalt seksjonsareal i parkeringskjellere uten sprinkleranlegg er 2.500 m<sup>2</sup>, mens maksimalt seksjonsareal med sprinkleranlegg er 5.000 m<sup>2</sup>.
- Det er krav om installasjoner for å sikre dekning for brannvesenets radiosamband.
- Gasskjøretøy er nektet adgang i noen parkeringskjellere. Dette bestemmes av eiere av anleggene, og ikke av det offentlige.

#### Belgia

- Det er krav om
  - o brannalarmanlegg for areal større enn 1.500 m<sup>2</sup>
  - o røykventilasjon for areal større enn 2.500 m<sup>2</sup>
  - o tørt sprinkleranlegg<sup>13</sup> for areal større enn 3.500 m<sup>2</sup>
  - o spinkleranlegg for areal større enn 9.260 m<sup>2</sup> eller nederste etasje mer enn 15,3 meter under bakkenivå
- Krav til automatiske parkeringsanlegg er
  - o tørt sprinkleranlegg fra 1 - 10 biloppstillingsplasser
  - o brannalarmanlegg og mekanisk røykventilasjon dersom det er flere enn 10 biloppstillingsplasser
- For parkeringskjellere større enn 1.000 m<sup>2</sup> anbefales en ventilasjon på minst 120.000 m<sup>3</sup>/time.
- Det er ingen forbud mot gasskjøretøy i parkeringskjellere, men høyere forsikringspremie for parkeringskjellere som godtar gasskjøretøy.

#### Nederland

- I parkeringskjellere større enn 1.000 m<sup>2</sup> kreves sprinkleranlegg og mekanisk røykventilasjon på minimum 1,5 m/s.
- Automatiske parkeringsanlegg skal ha installert sløkkeanlegg.
  - o Gassløkkeanlegg er mest vanlig.
  - o Brannvesenet skal i utgangspunktet ikke utføre sløkking i slike anlegg.
- Det er krav om CFD-analyse for å undersøke funksjonen av røykventilasjonssystemet for usprinklede arealer større enn 5.000 m<sup>2</sup>.

<sup>12</sup> Et termisk røykventilasjonssystem utnytter de naturlige oppdriftskreftene til røyken, og har åpne luker i taket, eventuelt ventilasjonskanaler som leder røyken naturlig ut.

<sup>13</sup> Basert på vanntilførsel fra brannvesenets pumper.



- Det skal tilrettelegges for rednings- og slokkeinnsats ved
  - o tørropplegg i trappenedganger
  - o trykksatte trappenedganger med sluser
  - o strobelamper som viser anbefalt trappenedgang for slokkeinnsats
- Det er ingen forbud mot gasskjøretøy.
- Parkeringskjellere skal være utstyrt med gassdeteksjon ved ventilasjonssystemets avtrekkspunkt.
- Gassdeteksjon skal kobles til ventilasjon og varselskilter.

#### 4.1.4 Utfordringer ved brann- og redningsinnsats i parkeringskjellere

Dersom en brann oppstår i en parkeringskjeller, er dette ofte en svært krevende oppgave for brannmannskap, uavhengig av type drivstoff som er involvert. Dette skyldes eksempelvis følgende faktorer:

- Vanskelig tilkomst  
De fleste parkeringskjellere har en takhøyde som ikke gjør det mulig å kjøre en brannbil inn i den. Vanskelig tilkomst vil også gjøre det vanskelig å frakte ut et elkjøretøy som brenner eller har brent, spesielt i automatiske parkeringsanlegg og garasjer med bilheis.
- Kun én nedkjøringsrampe  
De fleste parkeringskjellere har kun én nedkjøringsrampe. Det kan dermed være mange hundre meter inn til brannen.
- Lange slangeutlegg  
Den vanskelige tilkomsten og mangel på nedkjøringsramper gjør det nødvendig med lange slangeutlegg.
- Få avlastingsflater  
Få nedkjøringsramper gir også få avlastingsflater, noe som er uheldig hvis det skulle skje en eksplosjon.
- Dårlig sikt  
En brann i en parkeringskjeller gir raskt dårlig sikt, noe som gjør slokkearbeid mer krevende.
- Variesende grad av ventilasjon og sprinkleranlegg  
Krav om både sprinkleranlegg og ventilasjon i større garasjer er ikke gjeldende for garasjer som ble bygget før regelverket trådte i kraft. Ved brann vil mangel på slokkeanlegg bidra til høye temperaturer og økt sannsynlighet for spredning av brannen til andre nærstående kjøretøy. Det er ikke gitt at et sprinkleranlegg klarer å slokke en bilbrann, fordi det som brenner ofte befinner seg inne i bilen godt beskyttet av tak og dører, og vannet vil i så fall ikke treffe brannen direkte. Sprinkleranlegg er likevel et viktig tiltak for å kjøle ned røykgasser og redusere sannsynligheten for brannspredning [43].
- Dårlig sambandsforbindelse  
Flere brannmannskap har uttrykt at sambandet ofte ikke fungerer optimalt under innsats i parkeringskjellere.

## 4.2 Skip

Et brannforløp på et nedre parkeringsdekk på en ferje vil på mange måter kunne utvikle seg nokså likt en brann i en parkeringskjeller, mens et brannforløp på overdekket vil kunne ligne en brann i parkeringshus over bakken. Imidlertid er det som regel færre mennesker til stede i rom på skip (over eller under dekk) der brann i kjøretøy kan oppstå.

På den annen side; hvis slokkeanlegget og eventuell manuell innsats ikke er tilstrekkelig til å slokke et raskt brannforløp, vil en brann på et skip kunne få dramatiske konsekvenser for passasjerer og besetning. På ferjer og lasteskip er det krav om å ha slokkeanlegg i innelukkede rom, og ellers der det oppbevares farlig last [91].

I 2010 begynte det å brenne i en elbil som sto til lading om bord i passasjerferjen *Pearl of Scandinavia* [75]. Brannen ble slokket av sprinkleranlegget og av innsats fra personalet om bord, og ingen kom til skade. I kjølvannet av hendelsen innførte Det Forenede Dampskibs-Selskab (DFDS) forbud mot lading av elbiler under overfart [76].

I 2014 kritiserte Elbilforeningen ferjeselskapet Fjord-1 for å ha nektet elbiler på nedre ferjedekk. Fjord-1s argument var at kunnskapen om sikkerhetsrisiko for elbiler tilsa at de ikke burde oppbevares i innelukket rom [92].

### 4.3 Tunnel

En tunnel skiller seg fra parkeringsfasiliteter i bygg og på ferjer ved at kjøretøyene primært er i bevegelse. Det er større sannsynlighet for at det oppstår brann i et kjøretøy i bevegelse enn i et parkert kjøretøy, enten i forbindelse med en kollisjon eller som følge av varmgang i bremses eller motorrom. I tillegg vil det i en tunnel kunne befinne seg store kjøretøy og kjøretøy med farlig gods. Dersom en brann oppstår i et kjøretøy når det er mye trafikk gjennom en tunnel, kan brannen spre seg til flere kjøretøy.

Norge er blant landene i verden som har flest veitunneler. Tunnelene varierer i lengde, i størrelse og i antall biler og passasjerer som kan befinne seg inne i tunnelen. De kan ligge over eller under sjøen eller bakken, og ha ulik grad av stigning. Undersjøiske veitunneler og tunneler med høy stigningsgrad er overrepresentert i statistikken over branner og branntilløp i kjøretøy [93].

Konsekvensene av en tunnelbrann avhenger av mange faktorer, som avstand til nærmeste nødutgang, ventilasjon og sikt. I mange tunneler er de eneste sikre nødutgangene gjennom endene av tunnelen, og avstanden dit kan være flere kilometer. Ved brann i en tunnel kan temperaturen stige raskt opp til svært høye temperaturer, og risiko for struktorkollaps, fallende elementer og røykutvikling gir store utfordringer ved evakuering, og for slokkeinnsatsen til brannvesenet. Det er flere eksempler på tilfeller der det har gått fryktelig galt. I Mont Blanc-tunnelen i 1999 var 26 biler i brann og 39 personer omkom, og i St. Gotthard-tunnelen i 2001 omkom 11 personer etter brann [94]. Begge brannene ga rask brannutvikling med ekstreme temperaturer og sterk røykutvikling, noe som er typisk for tunnelbranner, og resulterte i store materielle skader. Mont Blanc tunnelen var stengt i mer enn 3 år etter brannen [94].

Ventilasjon i tunnel er et omdiskutert tema. På den ene siden er ventilasjon nødvendig for å la brannmannskaper komme til brannstedet. På den annen side vil ventilasjonen føre til at alle personer som befinner seg på nedstrøms side av brannen bli fanget i røyken. Forsøk har også vist at brannintensiteten kan bli mange ganger større ved ventilasjon [95].

Flere ulykker i Norge har ført til at temaet sikkerhet i tunneler er svært aktuelt. Gudvangatunnelen stengt i to og en halv uke etter bussbrannen i 2015, og reparasjonskostnadene kom på nesten 30 millioner kroner [96]. I 2015 krasjet en tankbil med drivstoff i den undersjøiske Skatestraumtunnelen. Det var fare for at tunnelen skulle kollapse [97], og de materielle tapene ble estimert til over 50 millioner kroner [98].

Den økte bruken av alternative energibærere vil føre til en økning i tungtransport som frakter store mengder gass gjennom tunnelene. Flere europeiske land har forbud mot gasskjøretøy gjennom tunneler. Det er eksempelvis ikke tillatt å kjøre biler som benytter LPG, CNG eller LNG gjennom Eurotunnelen (tunnelen mellom Frankrike og England). Når den undersjøiske vegtunnelen E39 Rogfast, som også blir verdens dypeste, åpner om ti år, kan det bli innført restriksjoner for ulike drivstofftyper, eksempelvis forbud mot frakt av LPG.

Faktorer som er spesielt utfordrende hvis det oppstår brann i tunnel der det ferdes kjøretøy med alternative energibærere, er vanskeligheter med å identifisere kjøretøy, og usikkerheter med hensyn til plassering av eventuelle gasstanker, om sikkerhetsventiler på disse er utløst, og i hvilken grad gassen kan ha blitt akkumulert på ukjente steder i tunnelen.

I artikkelen *CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels* [99] ble det utført CFD-analyser av gasslekkasjer med påfølgende eksplosjon i tunnel. Eksplosjon fra gasskyer med størrelser fra  $5 \text{ m}^3$  ( $0,1 \text{ m} \times$  tunneltverrsnitt) til  $1.000 \text{ m}^3$  ( $20 \text{ m} \times$  tunneltverrsnitt) i tre ulike tunnelgeometrier ble simulert, tilsvarende størrelsen som kan oppstå ved henholdsvis små og store lekkasjer av CNG eller hydrogen fra en gassbuss og gassbiler. Resultatene viste at for den største gasskyen ( $1.000 \text{ m}^3$  tilsvarende mengden i en gassbuss) var det mulig å oppnå et overtrykk på opp mot 12 bar for hydrogen, og 0,6 bar for CNG. Det var altså en betydelig forskjell i eksplosjonstrykk for CNG og hydrogen. Ved å redusere gasskyen til  $250 \text{ m}^3$ , ble maksimalt overtrykk redusert kraftig. Overtrykket for de aller fleste gasskystørrelser lå da i området 0,1 - 0,3 bar. Det ble videre funnet at eksplosjoner i «hestesko-tunneler» blir mindre omfattende enn eksplosjoner i rektangulære tunneler. Beregningene i studien er konservative, og et reelt scenario kan derfor være mindre alvorlig enn de presenterte resultatene.

## 5 Diskusjon

Den raskt økende utbredelsen av alternative drivstofftyper medfører usikkerhet når det gjelder brannsikkerhet i innelukkede rom. Selve drivstofftypene, både konvensjonelle og alternative, har svært ulike branntekniske egenskaper. Kjøretøy som bruker drivstoff forbundet med høy brann- og eksplosjonsfare er imidlertid utstyrt med sikkerhetsmekanismer som skal forhindre brann og eksplosjon. Vi mener likevel at det er flere problemstillinger som bør undersøkes nærmere før det kan konkluderes med om kjøretøy med alternative drivstoffer i innelukkede rom utgjør en høyere brann- og eksplosjonsrisiko enn konvensjonelle kjøretøy.

Utviklingen av en brann i et innelukket rom avhenger av rommets geometri, ventilasjon, slokkesystemer og brannenergi (eksempelvis kjøretøy og drivstoff). I innelukkede rom kan en brann bli varmere enn i åpne omgivelser. Innelukkede rom inneholder også gjerne en samling kjøretøy med ulike drivstoffer, og det er derfor spesielt viktig å begrense risikoen for brannspredning.

Selv om sprinkler-/vanntåkeanlegg kan medføre dårlig sikt og røykspredning i innelukkede rom, vil det totalt sett ha en positiv effekt ved å hindre varmeutvikling og videre spredning av brann. Imidlertid bør det gjøres videre studier av effekten som automatiske slokkeanlegg har på slokketid, røyk- og brannspredning ved branner som involverer alternative energikilder i innelukkede rom.

Avsnitt 5.1 – 5.2 omhandler henholdsvis el- og gasskjøretøy i innelukkede rom generelt, mens avsnitt 5.3 omhandler parkeringsanlegg spesielt.

### 5.1 Elkjøretøy i innelukkede rom

For en rent batteridrevet bil er det lav eksplosjonsrisiko. Det kan imidlertid oppstå batteribrann i elbil, enten ved en intern brann i batteriet eller ved at en brann sprer seg til batteriet fra utsiden. Så lenge mennesker er reddet ut av en elbil som brenner i åpne omgivelser, er det generelt trygt å la den brenne ut. Det er likevel flere problemstillinger som bør utredes nærmere når det gjelder elbilbranner i innelukkede rom.

#### **Forslag til tiltak og videre arbeid**

##### Studere ulike elbilmodeller

Nyere elbilmodeller benytter ulike batteriteknologier. Eksempelvis har en Volkswagen e-UP en batterikapasitet på 18,7 kWh, mens en Tesla kan leveres med et batteri på 85 kWh. For de fleste andre elbilmodeller ligger batterikapasiteten et sted i mellom disse verdiene. Videre varierer ulike elbilmodellens batterier både med hensyn til størrelse, hvilken batterikjemi som er benyttet, energitettheten til battericellene, antall battericeller, og ikke minst hvilke sikkerhetsmekanismer som skal beskytte batteriet mot at thermal runaway oppstår.

##### Varmeutvikling

Branntestene som foreløpig er utført har gitt mye verdifull informasjon, men de er utført på relativt små batterier (16 – 23 kWh). Det er derfor knyttet en viss usikkerhet til om testene er relevant for slokketid og varmeavgivelse ved brann i de største batteriene på markedet i dag, og det er nødvendig å innhente mer kunnskap om dette, spesielt for branner i innelukkede rom.

Thermal runaway oppstår når temperaturen i batteriet kommer opp i 130 – 200 °C. Ved en brann i et innelukket rom uten tilstrekkelig avkjøling, kan temperaturen i rommet bli

langt høyere enn dette. Det bør kartlegges hvilken temperatur kjøretøyets omgivelser må ha før thermal runaway induseres i batteriet, hvor lang tid det tar, og om det er forskjeller mellom ulike bilmodeller. Dette vil ha betydning for hvordan en brann kan spre seg i et innelukket rom med flere kjøretøy.

### Slokking av batteribrann

En elbilbrann kan sløkkes med lite vann, men siden thermal runaway er en intern prosess som ikke lar seg stoppe, er det stor sannsynlighet for at batteriet reantenner, enten umiddelbart eller etter en tid. På grunn av få rapporterte hendelser, er det ingen sikre tall på hvor lang tid det kan ta å slukke en elbilbrann. Dette vil også variere ut fra hvor stort batteriet er, hvor stor brannenergi resten av bilen utgjør, hvor godt sløkevannet utnyttes, og graden av innelukkning av omgivelsene. De få fullskalatestene som er utført indikerer at det kreves mer vann og lengre sløkketid enn for en konvensjonell bilbrann. Andre tester har vist at vann med tilsatser av tensider kan være effektivt ved sløkking av batteribrann. At det benyttes mange ulike tekniske løsninger for batteriteknologi i elbiler kan også ha betydning for brannforløp og sløkking.

Det bør innhentes mer kunnskap om optimal sløkkemetode og sløkketid for elbilbranner i innelukkede rom. Hvis det viser seg at lang sløkketid er uunngåelig, eller at det er hensiktsmessig å la kjøretøyet brenne ut, bør det tas høyde for flere problemstillinger:

- Lang sløkketid gir større utslipp av giftig røyk, noe som medfører fare for personskader og kompliserer redningsinnsats. Det bør vurderes om det er tilstrekkelige muligheter for avkjøling av brannen og rommet, eksempelvis ved brannvesenets tilgang til vann eller ved automatiske sløkkesystemer, som sprinkler-/vanntåkeanlegg. Det bør også vurderes om ventilasjonssystemet til bygget er tilstrekkelig, eller om den økte røykproduksjon i kombinasjon med sprinkling vil medføre dårligere sikt, noe som igjen medfører evakueringsutfordringer og krevende forhold for brannvesenet. Hvis varmeavgivelsen til omgivelsene under brannen er mer langvarig enn hva bygningsstrukturen er dimensjonert for, er det fare for bygningskollaps. Seksjoneringen av bygget er et bygningsteknisk tiltak som begrenser både røykspredning og varmeoverføring til bygningsstrukturen.
- Et alternativt tiltak er å frakte ut den brennende bilen. Dette vil kreve god tilkomst for brannvesenet. Å legge til rette for sikker utfrakt av bilen fra innelukkede rom bør uansett være et krav, da det ved elbilbrann er fare for reantennning etter sløkking. Elbilen bør derfor kunne fraktes brennende til et trygt sted der den kan brenne ut, eller den bør fraktes ut like etter sløkking. Hvis den fraktes brennende ut, må det sikres at kjøretøy i nærheten ikke antennes.

## 5.2 Gasskjøretøy i innelukkede rom

Foreløpig er det en liten andel gasskjøretøy på norske veier, men det forventes at andelen øker. I Norge inkluderer gasskjøretøyene hovedsakelig LPG-biler (person-, vare- og lastebiler), biogass- og CNG-busser og noen hydrogendrevne kjøretøy. Ulike gasser har svært ulike egenskaper, og det er også forskjeller mellom gasskjøretøy og konvensjonelle kjøretøy. Eksempelvis vil bensin fordampe ved en lekkasje. Bensindampen er tyngre enn luft og vil befinne seg i nærheten av ulykkesbilen. Dermed vil den utgjøre en fare for overlevende som er fanget i bilen. LPG vil også synke ved en lekkasje, mens hydrogen vil stige opp og fortynnes raskere enn noe annet drivstoff.

Utslipp av gass kan skje ved skade på gasstanken, utette koblinger eller slanger, eller ved trykkavlastning. I innelukkede rom kan antennelse av utslipp av gass fra tanken, eller brann i nærheten av et gasskjøretøy, medføre eksplosjon. Hydrogen har et mye bredere eksplosjons-

område enn LPG, og er svært lettantennelig. Hvordan gassen fra en lekkasje brer seg i rommet, er viktig å ta hensyn til ved plassering av gassdetektorer og ventilasjonssystemer. Hydrogengass har også den egenskapen at den kan selvantenne ved et kraftig utslipp. Som nevnt, stiger hydrogengassen ved lekkasje. Forsøk har imidlertid vist at ved et lite, kontinuerlig utslipp kan hydrogenkonsentrasjonen i rommet være tilnærmet homogen [100]. På grunn av hydrogenmolekylets størrelse, vil det også være en liten kontinuerlig hydrogenlekkasje gjennom tankene. Denne lekkasjen anses imidlertid som ufarlig.

Det gjenstår flere ubesvarte spørsmål med hensyn til brann- og eksplosjonsrisikoen for gasskjøretøy i innelukkede rom.

### **Forslag til tiltak og videre arbeid**

#### *Sikkerhetsmekanismenes robusthet*

En brann i nærheten av et gasskjøretøy i et innelukkede rom vil kunne medføre at temperaturen og trykket i tanken øker. Hvis sikkerhetsventilen fungerer slik den skal, vil gassen ventileres ut. Dersom det er en tennkilde i umiddelbar nærhet til gasstrømmen, vil gassen antennes, og det oppstår en jetbrann. Dersom det ikke er en tennkilde i umiddelbar nærhet, vil det oppstå en situasjon der hele tankens innhold frigjøres inne i rommet. Gasskyen vil blande seg med annen røyk, og mest sannsynlig antennes på et eller annet tidspunkt. Hvis sikkerhetsventilen ikke fungerer slik den skal, kan trykket i tankene øke til tankveggene brister, slik at tanken eksploderer. Det er flere eksempler på at ikke-fungerende sikkerhetsmekanismer har ført til ulykker. Tester indikerer at sikkerhetsmekanismene er pålitelige når bilene er nye, men det bør gjøres undersøkelser av hvordan sikkerhetsmekanismer påvirkes av alder og slitasje.

Tester har avdekket at smeltesikringen i noen tilfeller ikke fungerer etter hensikten. Hvis for eksempel tanken varmes opp svært lokalt av en mindre stikkflamme, kan temperaturen i tanken øke uten at smeltesikringen brister.

#### *Sikkerhetsventilens plassering*

Retningen til en jetbrann etter utventilering av gass avhenger av plasseringen av sikkerhetsventilen. En jetbrann er et forutsigbart scenario så lenge flammene ikke treffer personer eller antenner annet materiale, og utendørs er ikke dette mer dramatisk enn en tradisjonell bilbrann. I innelukkede rom vil flammene treffe hindringer, og det bør vurderes hva som er den optimale retningen til jetbrannen, og om plasseringen til sikkerhetsventilene skal standardiseres.

Dersom gassen ved et utslipp fra en hydrogentank brenner opp, vil en slik jetbrann ha mindre energi enn en vanlig bensin- eller dieselbrann, da en full hydrogentank tilsvarer energimengden til ca. 20 liter bensin eller diesel. Varmen fra en hydrogenbrann er likevel tilstrekkelig til at en nærstående bil vil kunne ta fyr.

#### *Oppvarming av gasstanker fra brann i nærheten*

Maksimalt tillatt materialtemperatur for hydrogentanker med tanke på lekkasje gjennom tankveggen er satt til 85 °C. Det bør undersøkes om det kan føre til hydrogenlekkasje hvis romtemperaturen overstiger 85 °C, noe som kan skje ved en brann i nærheten av kjøretøyet. Det samme spørsmålet kan stilles om smeltesikringen for gasstanker. Er det mulig at denne kan løse ut på grunn av varme omgivelser før andre deler av bilen spontanantennes? I så fall vil hele gasstankens innhold slippe ut, for deretter å kunne bli antent og eksplodere ved et senere tidspunkt.

#### *Gassdeteksjon og -ventilasjon*

Krav om røykventilasjon bør knyttes opp mot krav om gassdetektorer. Uten detektorer kan ventilasjonen kun startes ved manuell innmelding, og dette er et lite redundant

system. Propan er i seg selv usynlig, men et stort utslipp av LPG vil involvere flytende propan som fordampes på bakken og er mulig å se. Videre er propan tilsatt et lukkestoff som gjør at man kan lukte det ved ca. 0,4 %, som er en femtedel av LEL. Hydrogen, på den annen side, er både usynlig og luktfri, og akkumulering kan kun oppdages av gassdetektorer. Ved innstallering er det viktig å plassere ventilasjons- og deteksjonssystemer ut fra i hvilken grad gassene akkumuleres på bakken eller stiger mot taket, og hvor homogent gassene vil fordele seg i rommet. For å oppnå god responstid, må plassering av gassdetektorer sikre et tilstrekkelig dekningsområde. Installasjoner tilknyttet gassdeteksjon/-ventilasjon må være Ex-sikre.

### 5.3 Parkeringskjellere

På grunn av fortetting i og rundt byene, blir stadig flere biler parkert under bakken. Samtidig er det et raskt økende antall el- og gasskjøretøy. Spørsmålet er om dagens parkeringskjellere er rustet for denne utviklingen, og om gjeldende regelverk er godt nok oppdatert. Dette kan bli enda viktigere i fremtiden, hvis det satses på automatiske parkeringsbygg med stabling av biler, noe som både kompliserer brannvesenets innsats, og gir varmere branner.

Tilstanden til dagens parkeringskjellere er svært varierende med tanke på størrelse, utforming, innsatsveier og evakueringsveier, ventilasjon og brannsikrende tiltak. Samtidig er takhøyden vanligvis så lav at ordinære brannbiler er for store til å kunne kjøre inn. Parkeringskjellere bygges erfaringsmessig for å tilfredsstille absolutte krav, og øvrige anbefalinger blir sjelden fulgt. Disse faktorene til sammen bidrar til at en brann i et garasjeanlegg, uavhengig av drivstoff og brannenergi, er en til dels uoversiktlig hendelse, og en utfordring for brannvesenets innsats.

Dagens bygningstekniske krav til parkeringskjellere skiller ikke mellom ulike drivstoffer, og er basert på erfaringer med konvensjonelle kjøretøy. Ved parkering av el- og gassbiler tilføres et nytt usikkerhetsmoment, og spørsmålet er om usikkerheten er berettiget. Enkelte private aktører innfører forbud mot parkering av el- eller gassbiler i parkeringskjellere, mens andre tillater det. Det må tydeliggjøres i regelverket hvilke tiltak som er tilstrekkelig for at el- og gassbiler trygt skal kunne parkeres under bakken.

Byggeforskriftene tillater parkeringskjellere på opptil 10.000 m<sup>2</sup>. I store parkeringskjellere med utfordrende geometri er det spesielt viktig å vurdere om seksjonering, avlastningsareal og tilkomst for brannvesenet er tilstrekkelig. Viktigheten av dette blir ikke mindre når det i tillegg må tas hensyn til en eventuell brann i, eller i nærheten av, et gasskjøretøy med potensiell eksplosjonsrisiko, og elbiler der branner kan gi økt røykutvikling som følge av lang slokkesetid.

Bygningsstrukturen til en parkeringskjeller er normalt beskyttet mot brann i 120 minutter. En brann som involverer flere kjøretøy kan brenne lenger enn dette [101]. At bygningsstrukturen blir utsatt for en brann som varer lenger enn den er dimensjonert for, kan medføre bygningskollaps. I Sveits i 2004 ble sju brannmenn drept da taket i en parkeringskjeller kollapset under en brann [102].

Kunnskaps- og erfaringsgrunnlaget er enda ikke tilstrekkelig til å konkludere om parkering av el- og gassbiler medfører høyere brann- og eksplosjonsrisiko i parkeringskjellere. På grunn av den raske utviklingen i antall kjøretøy med nye drivstoffer, er det imidlertid viktig å allerede nå vurdere om det bør gjøres bygningstekniske tilpasninger i regelverket for å sikre effektiv brann- og redningsinnsats, og ivareta sikkerheten for personer og bygninger. Det må tas høyde for at andelen av de ulike drivstoffene endrer

seg over tid, og det mest optimale vil selvfølgelig være parkeringskjellere som er tilpasset biler uavhengig av type drivstoff.

I avsnitt 5.1 - 5.2 ble det nevnt flere mulige tiltak for å ivareta brannsikker for el- og gasskjøretøy i innelukkede rom generelt, men som også er relevant for parkeringskjellere. Videre i dette avsnittet diskuteres øvrige tiltak som er spesielt knyttet til parkeringskjellere.

### 5.3.1 Elbiler og ladbare hybrider i parkeringskjellere

#### Plassering av elbiler

Parkering og lading av elbiler er gjerne sammenfallende. Forutsatt at lading av elbiler i parkeringskjeller kan anses som trygt, kan plassering av ladepunkter være et verktøy for selektiv plassering av elbiler. Det må i så fall utredes hva som er hensiktsmessig plassering, og det må tas høyde for at antallet elbiler vil øke med tiden. For å lette brannvesenets arbeid med utfrakt av en brennende eller slokket elbil, kan det være hensiktsmessig å plassere elbiler nær inn-/utkjøring i parkeringskjellere, der det også er tilgang på tilstrekkelige mengder slokkevann.

#### Sprinkler-/vanntåkeanlegg

En forutsetning for å kunne la bilen kontrollert brenne ut, er at brannen ikke sprer seg, og at temperaturpåkjenningen på bygningsstrukturen ikke blir for høy. Behovet for systemer som skal kontrollere temperaturen ved en elbilbrann må utredes nærmere. Inntil konklusjoner fra en slik utredning foreligger, bør sprinkler-/vanntåkeanlegg være et midlertidig krav i parkeringskjellere som skal huse elbiler.

### 5.3.2 Gassbiler i parkeringskjellere

Norge har et regelverk som forbyr oppbevaring av gass under bakken [84]. Samtidig er det ikke forbud mot å parkere gassbiler i parkeringskjellere. Selv om moderne gassbiler har sikkerhetsmekanismer som skal redusere sannsynligheten for at en lekkasje og en eksplosjon inntreffer, har inntrufne hendelser vist at sikkerhetssystemene ikke alltid fungerer etter hensikten. Ut fra ordlyden i regelverket (se avsnitt 4.1.1) er det ikke selvforklarende hvorfor gasstanker i gasskjøretøy skal vurderes annerledes enn gassflasker. Regelverket bør oppdateres, slik at det kommer tydelig fram hva som gjelder for underjordisk parkering av gasskjøretøy.

Når det gjelder i hvilken grad det skal være tillatt å parkere gassdrevne kjøretøy i parkeringskjellere, ser vi tre alternativer:

1. Tillate parkering av gassbiler i parkeringskjellere. Dette innebærer at eksisterende parkeringskjellere vil måtte vurderes til å gi tilstrekkelig brannsikkerhet.
2. Tillate parkering av gassbiler i parkeringskjellere som oppfyller bestemte bygningstekniske krav. Dette innebærer en endring i regelverket ved at det stilles nye bygningstekniske krav ved oppføring av nye parkeringskjellere. Det er viktig at det er tydelig merket om parkeringskjellere tillater gasskjøretøy eller ikke, både for å hindre feilparkering, og for at brannvesenet skal vite hvilke scenarier de potensielt kan møte.
3. Forby all parkering av gasskjøretøy i parkeringskjellere. I en studie fra 2009 ble det konkludert med at parkering av LPG-kjøretøy i parkeringskjellere i Norge var en uakseptabel risiko [90]. I kjølvannet av rapporten ble det tatt inn i Temaveiledningen om bruk av farlig stoff, at parkering av gassdrevne kjøretøy ikke skal foretas i garasjeanlegg som er plassert mer enn én meter under bakkenivå. Teksten ble fjernet fra Temaveiledningen etter ett år [85].



Med fremtidens satsning på gasskjøretøy, og det økende behovet for parkeringsplasser under bakken, fremstår alternativ 3 som urealistisk, forutsatt at alternativ 1 eller 2 er gjennomførbare.

Vi kan ikke påstå at dagens parkeringskjellere er mindre egnet til gasskjøretøy enn til kjøretøy med konvensjonelt drivstoff. Det er imidlertid flere usikkerhetsmomenter knyttet til gasskjøretøy i parkeringskjellere, som gjør en full tillatelse uheldig før disse er utredet. Vi mener derfor alternativ 2 er den mest forsvarlige løsningen.

Betydninger av et forbud mot parkering av gasskjøretøy i eksisterende parkeringskjellere som ikke oppfyller bestemte krav:

- Et forbud i dag vil ikke føre til store omveltninger for mange brukere, siden antallet gasskjøretøy foreløpig er lavt. Imidlertid kan det være politiske føringer som ikke ønsker et forbud.
- Et forbud vil redusere sannsynligheten for gasslekkasje og eksplosjon, og slik kunne gjøre slokke- og redningsinnsatsen ved en brann mer forutsigbar for brannvesenet.
- Det vil være muligheter for feilparkeringer, noe som medfører at brannvesenet uansett må ta høyde for at det kan være gasskjøretøy i bygget. I dagens garasjeanlegg er det dårlig sikt ved brann, og brannmannskapene har små muligheter til å undersøke hvilke kjøretøy som befinner seg i parkeringsbygget mens redningsinnsatsen foregår.

Spørsmålet er videre hvilke bygningstekniske krav som er nødvendige for trygg parkering av gasskjøretøy. Egnede krav kan være relatert til tekniske installasjoner eller utforming av bygget. Selv om vi nevner noen mulige krav her, må disse vurderes både hver for seg og helhetlig:

- En bygnings normalventilasjon har ikke tilstrekkelig effekt under en brann. For større parkeringsanlegg stiller TEK 10 krav om røykventilasjon på minst 1 m/s for parkeringskjellere større enn 400 m<sup>2</sup> uten automatisk slokkeanlegg. En ventilasjonshastighet på 1 m/s kan effektivt bidra til å fortynne gass til en ikke-eksplosiv blanding ved et mindre utslipp, men vil ikke være tilstrekkelig ved et større utslipp. Imidlertid er det kun et fåtall av dagens parkeringsanlegg som oppfyller kravet til røykventilasjon, da de fleste av dagens garasjeanlegg er bygd før kravet ble innført.
- VTEK 10 anbefaler at ventilasjon bør kunne aktiveres av detektorer for å hindre at eksplosive forhold oppstår, men det er få norske parkeringskjellere som følger anbefalingen. Uten gassdetektorer oppdages ikke nødvendigvis en lekkasje før det er akkumulert en gassky som potensielt kan antennes. Det er også få norske parkeringskjellere som oppfyller FM Globals anbefalinger til ventilasjon for bygninger som oppbevarer hydrogen [103]. Av ulykker som er registrert hos FM Global, har nesten alle hydrogenlekkasjer innendørs blitt antent, hvorav 75 % av har resultert i en eksplosjon og 25 % i en brann. Selv om dette i utgangspunktet ikke gjelder for hydrogenbiler i parkeringskjellere, bør relevansen vurderes.
- For å beskytte bygningskonstruksjonen, og samtidig gjøre brannvesenets arbeid mer forutsigbart med hensyn til hvilke scenarier de kan forvente, kan det vurderes om gasskjøretøy skal plasseres på merkede plasser. Per i dag kan det medføre utfordringer med feilparkering.

## 5.4 Øvrige risikofaktorer

Vi anbefaler også følgende tiltak generelt knyttet til temaet el- og gasskjøretøy i innelukkede rom:

- Det må vurderes om det er praktisk mulig å slukke eller frakte ut elbil i automatiske parkeringsanlegg. Hvis ikke, bør det vurderes om det skal være forbudt å parkere elbiler i slike garasjer.
- Det er oppstått branner under lading av elbiler, og det er derfor viktig å sikre at alle garasjeiere følger retningslinjer for sikker etablering av ladepunkter. Ladepunkter bør ikke plasseres i områder der det kan være risiko for gasslekkasje.
- Det bør innføres bedre systemer for kategorisering av kjøretøy i henhold til drivstofftyper. Dette vil gi bedre muligheter for god statistikk og erfaring fra ulykker. Det bør også tilrettelegges for god erfaringsoverføring fra hendelser.
- Det bør stilles bedre krav til merking av LPG-kjøretøy og ombygde kjøretøy. Det bør også være gode systemer for å fange opp manglende registrering av ombygde gasskjøretøy.
- Brannsikker avhending eller gjenbruk av gamle eller skadede elbilbatterier er faktorer som bør studeres, men som ikke er behandlet i denne rapporten.

## 6 Konklusjon

I denne rapporten har vi vurdert brannrisiko ved el- og gasskjøretøy i innelukkede rom, sett i forhold til kjøretøy med konvensjonelle drivstoffer. Det er en viss brannrelatert risiko ved alle typer drivstoffer som benyttes i kjøretøy. Mens det er lang erfaring med risiko og brannforløp når det gjelder konvensjonelle drivstoffer, gjør den raske innfasingen av nye energibærere at vi fremdeles mangler erfaring, og på mange områder ikke har god nok oversikt over potensielle risikofaktorer. Usikkerheten kan medføre høyere brannrisiko, men kan også føre til at det gjøres konservative valg som igjen påfører kjøretøy med alternative energibærere unødige begrensninger, både med tanke på veitrafikk og parkeringsmuligheter.

Ulike drivstoffer, både alternative og konvensjonelle, har svært ulike brann- og eksplosjonsegenskaper. Diesel anses som relativt trygt. Bensin anses som trygt ved fylling, men kan ved en lekkasje føre til både brann og eksplosjon. En eksplosjon kan forekomme dersom bensindamp akkumuleres, for eksempel ved et innendørs utslipp. Det kan oppstå brann i batteridrevne kjøretøy, men eksplosjonsfaren er lav. For gasskjøretøy kan det oppstå eksplosjon i innelukkede rom ved oppvarming av tank eller lekkasje som medfører akkumulering av gass. En eventuell høyere risiko for brann eller eksplosjon for de alternative drivstoffene, skal være kompensert for ved at kjøretøyene har innebygde sikkerhetsmekanismer. Det er imidlertid kritisk at disse virker som de skal, og at det gjøres en grundig vurdering av om sikkerhetsmekanismene er tilstrekkelige for scenarier i innelukkede rom.

### 6.1 Elkjøretøy

#### Utfordringer

Sammenlignet med brannrisiko for konvensjonelle kjøretøy, er de viktigste utfordringene ved batteridrevne kjøretøy

- potensielt lang slokketid og høyt vannforbruk
- fare for reantenning etter slokking

#### Videre arbeid

Det bør utredes nærmere hvordan en elbilbrann i et innelukket rom kan forløpe når det gjelder temperaturutvikling, optimal metode for slokking eller begrensning av brannen, slokketid, spredningsfare osv. Variasjon mellom ulike elbilmodeller bør studeres. Det er gjort mange studier på batteribranner, men det kreves flere fullskala branntester av elbilbranner og brannforløp i innelukkede rom for å oppnå mer kunnskap. Denne kunnskapen kan også gi kostnadsbesparelser, ved at man unngår unødig konservative løsninger.

Følgende spørsmål bør besvares i videre studier:

- Hvor lang tid tar slokking av brann i en elbil?
- Hvor varm kan en innendørs elbilbrann bli?
- Hvilket slökkemiddel er mest egnet, og hvor mye slökkemiddel krever en elbilbrann?
- Hvordan kan en elbilbrann spre seg (dette er også relevant for sikker utfrakt av brennende fartøy fra innelukkede rom)?
- Hvordan kan en brann spre seg til en elbil? Vil thermal runaway kunne initieres før andre deler av bilen (dekk m.m) tar fyr? Hvor lang tid tar i så fall dette?
- Hvilke røykgasser produseres ved brann i en elbil, og i hvilke konsentrasjoner?

## 6.2 Gassdrevne kjøretøy

### Utfordringer

Risikoen for brann og eksplosjon i gasskjøretøy skal være forebygget ved at kjøretøyene er utstyrt med sikkerhetsmekanismer. Ved flere ulykker har det vært ikke-fungerende sikkerhetsmekanismer, og det er manglende kunnskap om hvordan aldring og slitasje påvirker sikkerhetsmekanismer og lekkasje fra tank. Den største faren forbundet med et gasskjøretøy i innelukket rom er utslipp av gass, enten fra en lekk tank, utette koblinger eller slanger. Hvis gassen akkumuleres og antennes, kan selv små utslipp føre til eksplosjon.

### Videre arbeid

Følgende spørsmål bør besvares i videre studier:

- Kan smeltesikringen til gasstankene ryke dersom det er en brann i nærheten, og hvor lang tid tar det? Kan det skje uten at gassen antenner?
- Hvilke deteksjons- og ventilasjonssystemer er egnet ved gasslekkasjer i ulike innelukkede rom?
- Hvordan påvirker aldring og slitasje funksjonen til sikkerhetssystemer og gasstanker?
- Hvordan vil aldring og slitasje på en hydrogentank påvirke bakgrunnslekkasjen?
- Ved utventilering av gass fra tanken vil en gasstrøm peke i en retning som kan være forskjellig for ulike kjøretøy. Bør plasseringen av sikkerhetsventilen standardiseres, og hvordan kan retningen på jetflammen påvirke brannscenarier i innelukkede rom?

## 6.3 Parkeringskjellere

### Utfordringer

Dagens parkeringskjellere er ikke bygget for tilstrekkelig sikkerhet når det gjelder ventilasjon, slokkesystemer, evakueringsmuligheter og redningsinnsats ved brann. Dette gjelder uavhengig av type drivstoff.

### Anbefalinger

- Parkeringskjellere må ha tilgjengelige systemer for tilstrekkelig avkjøling av en brann i lang nok tid til å unngå at bygningsstrukturen kollapser. Inntil man har mer kunnskap om slokketid og redningsinnsats ved elbilbranner i parkeringskjellere, bør sprinkler-/vanntåkeanlegg være et minimumskrav for å tillate parkering av elbiler.
- Parkering av elbiler nær inn-/utkjøring kan gi best tilgang for brannvesenet, både i forhold til slokkearbeid og vanntilgang, og ved eventuelt utfrakt av bilen, enten brennende eller etter slokking for å unngå reantennning inne i garasjen.
- Det anbefales å tillate parkering av gassbiler i parkeringskjellere som oppfyller bestemte bygningstekniske krav. Sprinkler-/vanntåkeanlegg bør være et minimumskrav. Gassdetektorer vil kunne bidra til at en gasslekkasje oppdages før en eventuell antenning gir eksplosjon. Det bør være krav om Ex-sikre elektriske installasjoner.

## Referanser

- [1] The European Parliament and the Council of the European Union, “Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure,” *Official Journal of the European Union*, 2014.
- [2] “Ladbare biler i Norge sep, 2015,” *Grønn Bil*. [Online]. Available: <http://www.gronnbil.no/statistikk/>. [Accessed: 07-Dec-2012].
- [3] “Nasjonal strategi og finansieringsplan for infrastruktur for elbiler,” Transnova, 2014.
- [4] A. Lönnermark, “Special Fire Risks Associated with New Energy Carriers,” presented at the Fires in Vehicles (FIVE), 2010.
- [5] P. Klintbom, “Actions to Control Potential Risks with New Fuels in the Automotive Industry,” presented at the Fires in Vehicles (FIVE), 2010.
- [6] C. C. Grant, “Alternatively Fueled Vehicles: Research Needs in Support of Safety Standards,” presented at the Fires in Vehicles (FIVE), 2010.
- [7] R. Justen, R. Schöneburg, D. Scheunert, and A. Lamm, “Crash Safety of Lithium-ion Batteries in Hybrid Vehicles,” presented at the Fires in Vehicles (FIVE), 2010.
- [8] D. Dalrymple, “Emergency Response to Incidents Involving Hybrids & Electric Cars,” presented at the Fires in Vehicles, 2010.
- [9] V. Molkov, “Safety Issues of Hydrogen-Powered Vehicles,” presented at the Fires in Vehicles, 2010.
- [10] “Fire in a CNG bus,” Duch Safety Board, Sep. 2013.
- [11] M. Ahrens, “Automobile Fires in the U.S.: 2006-2010 Estimates,” presented at the Fire in Vehicles (FIVE), 2012.
- [12] “Alternative Fuel Vehicle Forecasts - final report,” Transportation Policy Research Center, 2015.
- [13] Statistisk Sentralbyrå, “Tabell: 07849: Registrerte kjøretøy, etter kjøringens art og drivstofftype (K).”
- [14] “Ofte stilte spørsmål,” *hydrogen.no*. [Online]. Available: <http://www.hydrogen.no/om-hydrogen/ofte-stilte-sporsmal/>. [Accessed: 17-Dec-2015].
- [15] “Press release. International Alliance Aims for All New Cars To Be Zero-Emission by 2050,” *ZEV Alliance*, 12-Mar-2015. [Online]. Available: <http://zevalliance.org/tags/press-release>. [Accessed: 18-Jan-2016].
- [16] “Alle nye biler med null utslipp innen 2050,” *Regjeringen.no*, desember-2015. [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/alle-nye-biler-med-null-utslipp-innen-2050/id2466010/>. [Accessed: 18-Jan-2016].
- [17] “Ruter vil bli best på elbuss,” *Osloby*, 27-Oct-2014. [Online]. Available: <http://www.osloby.no/nyheter/Ruter-vil-bli-best-pa-elbuss-7762066.html>. [Accessed: 12-Jan-2015].
- [18] J. K. Nøland, “Kartlegging av potensialet for batteridrift på ferger i Norge,” Zero Emission Resource Organisation (ZERO).
- [19] “Nasjonal tverrsektoriell biogasstrategi,” Klima- og miljødepartementet, Strategi T-1545, oktober 2014.
- [20] C. E. Thomas, “Summary comparison of alternative vehicles,” 2011.
- [21] “Hydrogen Mobility Europe (H2ME) is a flagship European project for hydrogen mobility,” *Hydrogen Mobility Europe*. [Online]. Available: <http://www.h2me.eu/>. [Accessed: 12-Dec-2015].
- [22] R. Ramsdal, “NEL OG REITANGRUPPEN Skal bygge 20 hydrogen-stasjoner i Norge,” *Teknisk Ukeblad*, 12-Mar-2015. [Online]. Available: <http://www.tu.no/samferdsel/2015/12/03/skal-bygge-20-hydrogen-stasjoner-i-norge>. [Accessed: 14-Jan-2016].

- [23] M. Gjerset and K. Asheim, “Virkemidler for hydrogenstasjoner i Norge og Skandinavia,” Zero Emission Resource Organisation (ZERO), 2014.
- [24] *NFPA 325: Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids*. The Association, 1994.
- [25] G. R. Astbury, “A review of the properties and hazards of some alternative fuels,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 86, no. 6, pp. 397–414, 2008.
- [26] “Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,” HAL Id: ineris-00973680, Apr. 2014.
- [27] L. Hoffmann, “Elbilsbränder efter mekanisk påverkan i form av kollision,” SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Rapport 2013:43, 2013.
- [28] S. Hegén Agerup and L. Schei Blikeng, “Brann i elektrisk bil,” Høgskolen Stord/Haugesund, Hovedprosjekt, 2013.
- [29] C. C. Grant, “Fire fighter safety and emergency response for electric drive and hybrid electric vehicles,” The Fire Protection Research Foundation, 2010.
- [30] Ø. Hasvold, “Sikker anvendelse av litiumbatterier,” Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), FFI-rapport 2010/00215, Jan. 2010.
- [31] F. Amon, P. Andersson, I. Karlsson, and E. Sahlin, “Fire risks associated with batteries,” SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Report 2012:66, 2012.
- [32] Mikolajczak, C., Kahn M., M., White, K., Long, T.R., “Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment,” The Fire Protection Research Foundation, 2011.
- [33] Q. Wang, P. Ping, and Z. Xuejuan, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery,” *J. Power Sources*, vol. 208, pp. 210 – 224, 2012.
- [34] D. H. Doughty, “Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance,” National Renewable Energy Laboratory, Albuquerque, New Mexico, USA, Oct. 2012.
- [35] J. R. Dahn, E. W. Fuller, M. Obrovac, and U. von Sacken, “Thermal stability of  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ ,  $\text{Li}_x\text{NiO}_2$  and  $\delta\text{-MnO}_2$  and consequences for the safety of Li-ion cells,” *Solid State Ionics*, vol. 69, pp. 265–270, 1994.
- [36] D. L. Gear, “Third Tesla fire in 6 weeks could spark federal inquiry,” *WIRED*, 07-Nov-2013. [Online]. Available: <http://www.wired.com/2013/11/3rd-tesla-model-s-fire/>. [Accessed: 04-Sep-2015].
- [37] T. Ohsaki, T. Kishi, and T. Kuboki, “Overcharge reaction of lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 146, pp. 97–100, 2005.
- [38] A. W. Golubkov, D. Fuchs, and J. Wagner, “Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes,” *R. Soc. Chem.*, vol. 4, pp. 3633–3642, 2014.
- [39] P. Andersson, P. Blomquist, A. Lorén, and F. Larsson, “Investigation of fire emissions from Li-ion batteries,” SP Technical Research Institute of Sweden, Fire Technology SP Report 2013:15, 2013.
- [40] C. C. Grant, “Responding to Electric Vehicle Battery Fires,” presented at the Fire in Vehicles (FIVE), 2014.
- [41] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, 3rd Edition. McGraw-Hill, 2001.
- [42] Standard Norge, “NEK 400:2014.” Norsk Elektroteknisk Komité, 2014.
- [43] P. C. Collier, “Car Parks - Fires Involving Modern Cars and Stacking Systems,” BRANZ, SR 255, 2011.
- [44] E. P. Roth and D. H. Doughty, “Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells,” vol. 128, pp. 308–318, 2004.
- [45] National Fire Protection Association, “Hybrid and electric vehicle emergency field guide,” ISBN: 978-1455911240, 2014.
- [46] L. Hoffmann, “Vattenbegjutning av 400 Volt traktionsbatteri i färskvatten og saltvatten,” SP Rapport 2014:9, Dec. 2013.
- [47] J. Millner, “Insats - El-, hybrid- og brintkjøretøyer,” Rescue guide, 2010.

- [48] “DEKRA - Lithium-Ionen-Batterien stellen in Brandversuchen Sicherheit unter Beweis.” [Online]. Available: [http://www.dekra.com/de/pressemitteilung?p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_id=ArticleDisplay\\_WAR\\_ArticleDisplay&ArticleDisplay\\_WAR\\_ArticleDisplay\\_articleID=24844066](http://www.dekra.com/de/pressemitteilung?p_p_lifecycle=0&p_p_id=ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay&ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay_articleID=24844066). [Accessed: 11-Dec-2015].
- [49] M. Bobert, “Brandprov på Li-Ion batterier,” SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP 302, Apr. 2013.
- [50] L. Hoffmann and T. Söderholm, “Elbilsbranden i Ösmo lördagen den 11:e Augusti 2012,” SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, ISBN 978-91-87017-84-1, 2013.
- [51] L. Hoffmann and D. Sturk, “E-fordons Potentiella Riskfaktorer vid Trafikskadehendelse,” SP Rapport 2013:58, 2013.
- [52] M. Stage, “Konkurs: Færgebrand kostede elbilfirma forretningen,” *Ingeniøren*, 02-Feb-2011. [Online]. Available: <http://ing.dk/artikel/konkurs-faergebrand-kostede-elbilfirma-forretningen-116155>. [Accessed: 12-Aug-2015].
- [53] S. Agerup and L. Blikeng, “Brann i elektrisk bil,” *Brannmannen*, 06-Jun-2013.
- [54] K. Bullis, “Are electric vehicles a fire hazard?,” *MIT Technology Review*, 2013.
- [55] U. Björnstig, J. Björnstig, and M. Lindquist, “Krascher med elhybridbilar - Analys av ett amerikanskt material 2004 - 2010,” FFI/Vinnovaprojektet Räddningskedjan - säker räddningsinsats vid krasch eller haveri med el- og elhybridfordon 2012-00032, 2012.
- [56] K. Bolstad and T. Urstad, “Personbil påkjørt av toget i Råde,” *Moss Avis*, desember-2015.
- [57] P. Fjermeros, “Havarikommisjonen vil ikke undersøke Tesla-brann,” *Varden*, 13-Jan-2016. [Online]. Available: <http://www.varden.no/nyheter/havarikommisjonen-vil-ikke-undersoke-tesla-brann-1.1489773>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [58] P. B. Sunderland, “Pressure Relief Devices for Hydrogen Vehicles,” presented at the Third European Summer School on Hydrogen Safety, 21-Jul-2008.
- [59] A. Kostival, C. Rivkin, W. Buttner, and E. Burgess, “Pressure Relief Device for High-Pressure Gaseous Storage Systems: Applicability to Hydrogen Technology,” National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-5400-6017 NREL/TP-5400-60175, Nov. 2013.
- [60] “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.
- [61] R. Stølås, “Brann i gassbuss på Birkelundstoppen,” *Bergens Tidende*, 23-Sep-2015. [Online]. Available: <http://www.bt.no/nyheter/lokalt/Brann-i-gassbuss-pa-Birkelundstoppen-3326997.html>. [Accessed: 17-Dec-2015].
- [62] P. Solberg and L. Bjerkan, “Gassbuss begynte å brenne på E6,” *Adresseavisen*, oktober-2014. [Online]. Available: <http://www.adressa.no/nyheter/trondheim/article10228194.ece>. [Accessed: 17-Dec-2015].
- [63] “Gas-powered buses – hazards and evacuation,” *hemmingfire.com*, 24-Feb-2014. [Online]. Available: [http://www.hemmingfire.com/news/fullstory.php/aid/2035/Gas-powered\\_buses\\_\\_96\\_hazards\\_and\\_evacuation.html](http://www.hemmingfire.com/news/fullstory.php/aid/2035/Gas-powered_buses__96_hazards_and_evacuation.html). [Accessed: 17-Dec-2015].
- [64] “Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research,” National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), DOT HS 811 267, 2010.
- [65] “Propane Tank Overfill Safety Advisory,” *Alternative Fuels Data Center*, 24-Jun-2010. [Online]. Available: [http://www.afdc.energy.gov/bulletins/technology\\_bulletin\\_1008.html](http://www.afdc.energy.gov/bulletins/technology_bulletin_1008.html).
- [66] O. Ryo and N. Masaharu, “Minimum ignition energy of hydrogen-air mixture: Effects of humidity and spark duration.,” *J. Electrostat.*, vol. 65, no. 2, pp. 87–93, Feb. 2007.
- [67] “Allowable Hydrogen Permeation Rate for Automotive Applications,” HySafe – Safety of Hydrogen As an Energy Carrier, Sixth framework programme network of excellence Deliverable D74 with Corr.1, 2009.

- [68] “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.
- [69] G. R. Astbury and S. J. Hawkworth, “Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2178–2185, 2007.
- [70] Y. Tamura, M. Takabayashi, and M. Takeuchi, “The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 6169–6175, 2014.
- [71] M. Zahirasri Mohd Tohir and M. Spearpoint, “Development of Fire Scenarios for Car Parking Buildings using Risk Analysis,” presented at the Fire safety science - Proceedings of the eleventh international symposium, 2014, pp. 944–957.
- [72] A. G. Venetsanos, P. Adams, I. Azkarate, A. Bengaouer, A. Brett, M. N. Carcassif, A. Engebø, E. Gallego, A. I. Gavrikov, O. R. Hansen, S. Hawkworth, T. Jordan, A. Kessler, S. Kumar, V. Molkov, S. Nilsen, E. Reinecke, M. Stöcklin, U. Schmidtchen, A. Teodorczyk, D. Tigreat, and N. H. A. Versloot, “On the use of hydrogen in confined spaces: Results from the internal project InsHyde,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 2693–2699, 2010.
- [73] *COMMISSION REGULATION (EU) No 406/2010 of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles*. 2010.
- [74] S. Kumar, S. D. Miles, P. Adams, A. Kotchourko, D. Hedley, P. Middha, V. Molkov, A. Teodorczyk, and M. Zenner, “HyTunnel project to investigate the use of hydrogen vehicles in road tunnels,” presented at the 3rd International Conference on Hydrogen Safety (ICH3), 2009.
- [75] Danish Maritime Accident Investigation Board, “Pearl of Scandinavia fire 17 November 2010,” Danish Maritime Authority, Marine accident report, 2011.
- [76] Ø. Larsen-Vonstett, R. T. Ege, and M. Nilsen, “Forbyr elbil-lading på fergene,” *VG*, 18-Nov-2010. [Online]. Available: <http://www.vg.no/forbruker/reise/reiseliv/forbyr-elbil-lading-paa-fergene/a/10019100/>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [77] X. G. Zhang, Y. C. Guo, C. K. Chan, and W. Y. Lin, “Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 3466–3475, Oct. 2007.
- [78] “Chapter V: Hydrogen Safety Barriers and Safety Measures,” HySafe – Safety of Hydrogen As an Energy Carrier, Biennial Report on Hydrogen Safety, May 2006.
- [79] “Stackparker,” *Multiparking*. [Online]. Available: <http://www.multiparking.no/stackparkers/>. [Accessed: 18-Dec-2015].
- [80] “Elbil fattade eld – 75 bilar skadade,” *Sveriges Radio*, 14-Oct-2015. [Online]. Available: <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=83&artikel=5673419>. [Accessed: 15-Jan-2016].
- [81] S. Forsberg, “Elbil brann i Helsingborg imorse,” *Laddaelbilen.se*, 13-Oct-2013. [Online]. Available: [http://www.laddaelbilen.se/2013/10/13/elbil-brann-i-helsingborg-imorse-\\*update!\\*-18729893](http://www.laddaelbilen.se/2013/10/13/elbil-brann-i-helsingborg-imorse-*update!*-18729893). [Accessed: 15-Jan-2016].
- [82] 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.
- [83] M. Zahirasri and M. Tohir, “Multiple vehicle design fire scenarios in car parking buildings,” University of Canterbury, PhD thesis, 2015.
- [84] Justis- og beredskapsdepartementet. *Forskrift 8. juni 2009 nr. 602 om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen*. 2009.
- [85] “Temaveiledning om bruk av farlig stoff, Del 1: Forbruksanlegg for flytende og gassformig brensel, versjon 2.” Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), Feb-2011.



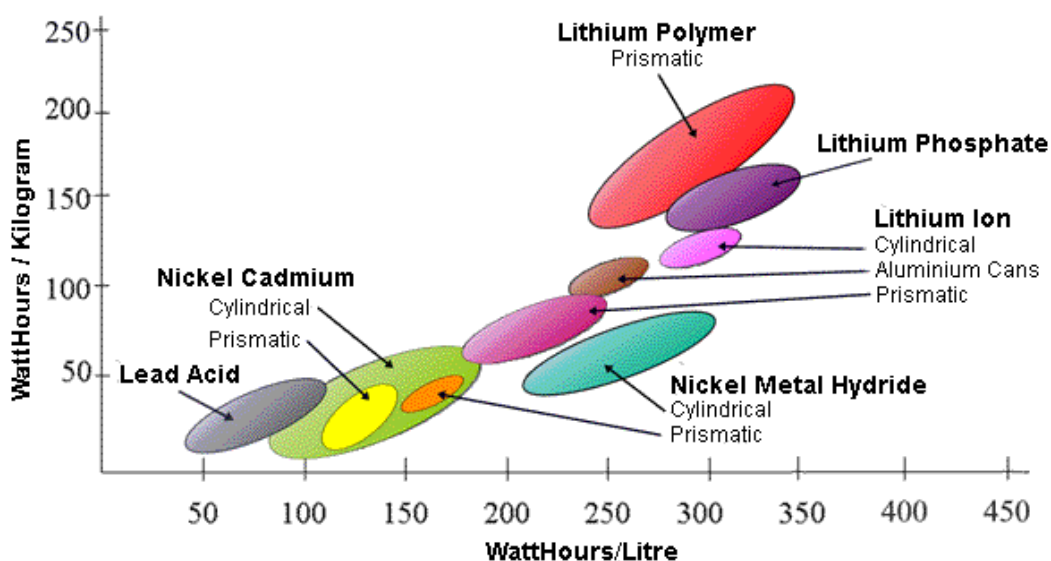
- [86] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 26. mars 2010 nr. 489 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10)*. 2010.
- [87] *Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK10)*. 2011.
- [88] B. E. O. Magnusson, “Røykventilasjon i lukkede parkeringsanlegg,” Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet. Institutt for bygg, anlegg og transport, Masteroppgave, Jun. 2012.
- [89] “Parkopedia.” [Online]. Available: <http://en.parkopedia.be/parking/carpark/savaanstraat/9000/gent/>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [90] Johansen, Daniel, Engmann, Morten, and Dyrød, Jostein, “Studierapport: Parkeringskjellere i Europa,” Reisetipend og utdanningsutvalget (RUU), 2009.
- [91] Nærings- og fiskeridepartementet. *Forskrift 1. juli 2014 nr. 1099 om brannsikring på skip*. 2014.
- [92] E. Skarsaune, “Elbil-nekt på nedre fergedekk,” *Stavanger Aftenblad*, 12-Jun-2014. [Online]. Available: <http://www.aftenbladet.no/trafikk/Elbil-nekt-pa-nedre-fergedekk-3580466.html>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [93] T.-O. Nævestad and S. Meyer, “Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011,” Statens vegvesen Vegdirektoratet, TØI rapport 1205/2012, 2012.
- [94] “Making Transportation Tunnels Safe and Secure,” Transportation research board, 12, TCRP REPORT 86/NCHRP REPORT 525, 2006.
- [95] R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt, and D. D. Drysdale, “Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels,” *Fire Saf. J.*, vol. 36, no. 6, pp. 569–596, Sep. 2001.
- [96] “Bussbrann i Gudvangatunnelen. Sammenligning mellom brannene i 2013 og 2015,” Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.
- [97] T. Mogen and K. Farooq, “Eksplasjon og stor brann i tunnel i Sogn og Fjordane. Frykter tunnelen kan kollapse,” *Dagbladet*, 15-Jul-2015. [Online]. Available: <http://www.dagbladet.no/2015/07/15/nyheter/innenriks/ulykke/40161069/>. [Accessed: 17-Dec-2015].
- [98] “Brann i Skatestraumtunnelen vil koste 50 millioner,” *Byggeindustrien*, 16-Aug-2015. [Online]. Available: <http://www.bygg.no/article/1243741>. [Accessed: 17-Dec-2015].
- [99] 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.
- [100] B. Cariteau, Brinster, J., and Tkatschenko, I., “Experiments on the distribution of concentration due to buoyant gas low flow rate release in an enclosure,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Feb. 2011.
- [101] “Fire spread in car parks,” Department for communities and local government (CLG), London, UK, BD2552, Dec. 2010.
- [102] P. Hody, “Seven Swiss Firefighters Die in Collapsed Parking Garage,” *Firehouse*, 27-Nov-2004. [Online]. Available: <http://www.firehouse.com/news/10514192/seven-swiss-firefighters-die-in-collapsed-parking-garage>. [Accessed: 16-Dec-2015].
- [103] “FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 7-91.” FM Global, 2012.

## Vedlegg A Fremdriftsteknologier og drivstoffer

Vedlegget beskriver alternative fremdriftsteknologier som er mest relevant for kjøretøy i Norge i dag.

### A.1 Batteriteknologi

I de siste årene har batteriteknologien utviklet seg raskt, både med hensyn til omfanget av batterityper og energitetthet. Figur A-1 viser at litium-ionbatterier er batteritypen med høyest energiinnhold per kg og i tillegg den minst volumkrevende.



Figur A-1 Energitetthet for ulike batterityper.<sup>14</sup>

De vanligste batteriene for bruk i elkjøretøy er ulike varianter av litium-ionbatterier. Det skyldes den høye lagringskapasitet i forhold til vekt. Dagens litium-ionbatterier kan veie mange hundre kg, og har omtrent fire ganger høyere energitetthet enn vanlige alkaliske batterier (slike vi finner i fjernkontroller, lommelykter m.m.). Den store energimengden er forventet å øke ytterligere med tiden ettersom teknologien blir bedre.

Litium-ionbatterier kan ha mange ulike former og fasonger. De kan være sylinderveformede, rektangulære eller de kan framstilles i en slags tettpakket pose, som minner om vakuumpakkede kaffeposer. Felles for alle disse er at de har en positiv og negativ elektrode, og en elektrolytt.

Elektrodene består av to ulike materialer og er adskilt av en separator. Separatoren har som oppgave å danne en fysisk barriere mellom anoden og katoden, men samtidig slippe igjennom litium-ioner. Separatoren består oftest av en porøs polyetylen- eller polypropylenfilm, og har en tykkelse på ca. 20 µm.

Enkelt forklart er elektrolytten et løsemiddel og et salt som gjør det mulig å transportere ioner. Elektrolytten består nesten utelukkende av litium-saltet LiPF<sub>6</sub> sammen med en

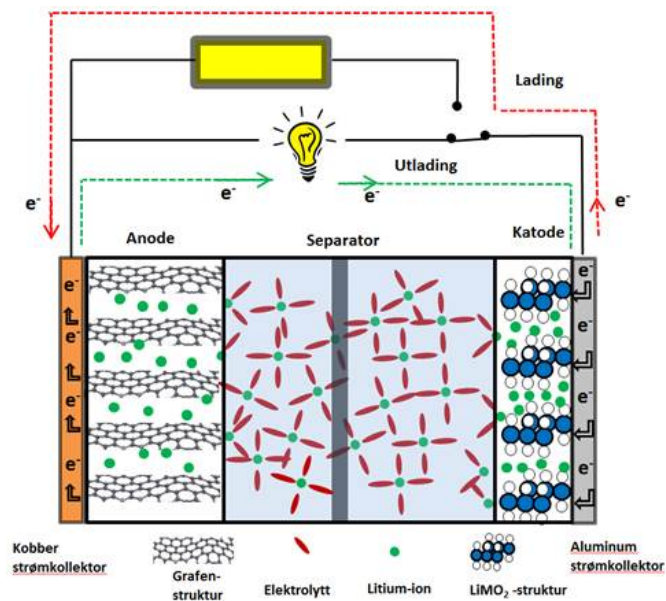
<sup>14</sup> Gjengitt med tillatelse: "The Electropaedia. Battery and Energy Technologies" [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>. [Accessed: 30-Nov-2015]

organisk løsemiddelblanding av karbonater, slik som etyl-, metyl- og metyl etyl-karbonat.

Anoden er av karbon, der grafitt er mest brukt. De vanligste katodematerialene er

1. litium manganoksid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )
2. litium-fosfat forbindelser ( $\text{LiFePO}_4$ )
3. litium-metalloksid ( $\text{LiCoO}_2$ )

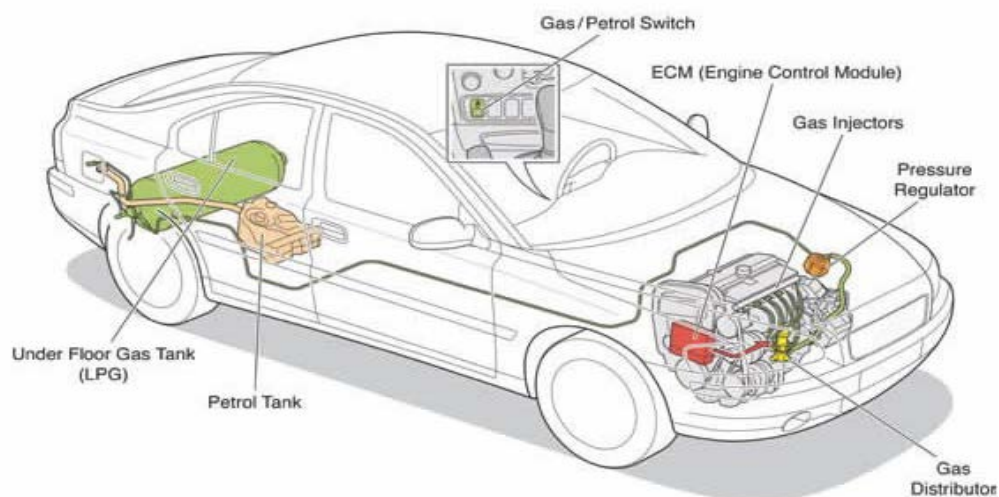
Når et litium-ionbatteri lades beveger litium-ioner seg fra katoden til anoden, mens elektroner strømmer via en ekstern elektrisk krets. Det motsatte skjer ved utlading av batteriet. Figur A-2 viser et typisk litium-ionbatteri.



**Figur A-2** Illustrasjon av et typisk litium-ion batteri.

## A.2 LPG

Dagens LPG-biler i Norge er ofte ombygde bensinbiler. Det vanligste er at LPG-systemet installeres som et supplement til bilens normale drivstoffsystem, slik at eieren kan bytte mellom bensin- og LPG-drift. Propantanken blir ofte plassert i bilens reservehjulbrønn, i lasterommet eller under bilen. I rør fra tanken til motorrommet via undersiden av bilen blir flytende propan omdannet til gass i en fordampner. Figur A-3 viser oppbyggingen av en bil som er ombygget for LPG-drift.

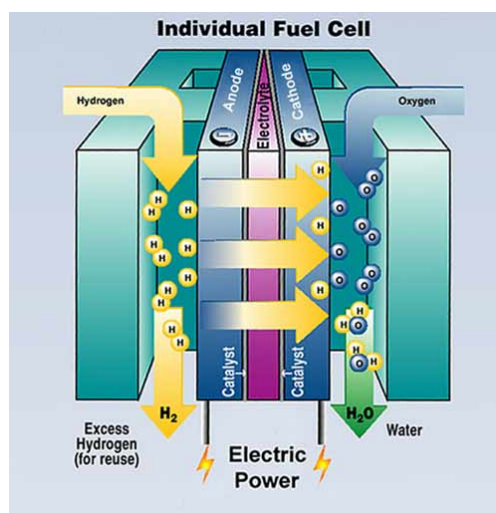


**Figur A-3** Eksempel på ombygging av en bil fra bensindrift til LPG gassdrift.<sup>15</sup>

### A.3 Hydrogencelledrift

En brenselcelle består hovedsakelig av tre komponenter, anode, katode og elektrolytt, og fungerer i prinsippet nesten som et batteri. Hovedforskjellen ligger i at den kjemiske energien i en brenselcelle kommer fra en ekstern kilde, mens i et batteri er den kjemiske energien lagret internt i systemet. Batteriet leverer strøm til det er tomt og må lades opp igjen, mens en brenselcelle kan fortsette å levere strøm så lenge man fyller etter med drivstoff.

I en hydrogencelle er drivstoffet hydrogengass. Figur A-4 skisserer de kjemiske prosessene i en hydrogencelle.



**Figur A-4** Skjematisk fremstilling av en brenselcelle.<sup>16</sup>

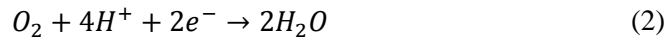
<sup>15</sup> "AutoVal UK.com. Bi-Fuel System (LPG) " [Online]. Available: <http://autovaluk.com/index.php?do=home.showArticle&article=LPG>. [Accessed: 30-Nov-2015]

<sup>16</sup> Gjengitt med tillatelse: fra US DOE, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. "HyGen. How a Hydrogen Fuel Cell Vehicle Works" [Online]. Available: <http://www.hygen.com/how-a-hydrogen-fuel-cell-vehicle-works/>. [Accessed: 30-Nov-2015]

Ved anoden blir hydrogengass,  $H_2$ , oksidert ved reaksjonen



der  $H^+$  er hydrogenioner og  $e^-$  elektroner. Elektrolytten adskiller anoden og katoden, og leder hydrogenioner, men ikke elektroner. Dermed blir hydrogenionene transportert gjennom elektrolytten til katoden, mens strømmen (elektronene) ledes vekk via en ekstern krets. Ved katoden blir oksygen,  $O_2$ , redusert og kan reagere med hydrogenionene for å danne vann,  $H_2O$ , ved reaksjonen



Nettoreaksjonen i en hydrogencellen er følgelig



der hydrogengass er drivstoffet, oksygen reaksjonsmediet og rent vann er restproduktet. I tillegg produseres strøm og varme.

Til forskjell fra de fleste LPG-biler i Norge, vil et hydrogenkjøretøy være bygd opp som et gasskjøretøy fra bunnen av. De viktigste komponentene er hydrogencellene, hydrogentankene, elektromotoren og et kraftig batteri.

Det finnes fire hovedtyper tanker for oppbevaring av hydrogengass. Disse er listet i Tabell A-1. Bruksområdene og bruddstyrkene varierer. Bilindustrien bruker hovedsakelig type 3 og type 4.

**Tabell A-1** Spesifikasjoner for ulike typer tanker for oppbevaring av hydrogen<sup>17</sup>.

Type	Materiale	Lagringstrykk
1	Metalltank (stål, aluminium)	175 – 200 bar
2	Metall omgitt av filament surringer (glassfiber, aramid eller karbonfiber)	263 – 299 bar
3	Laget av komposittmateriale (glassfiber, aramid, karbonfiber) med metallisk foring (aluminium eller stål)	305 – 700 bar
4	Tank laget av kompositt (karbonfiber) med en ikke-metallisk foring (polymer – HDPE ( <i>high-density polyethylene</i> ))	> 661 bar

<sup>17</sup> "Onboard storage of hydrogen," *Clefs CEA*, vol. 50/51, 2005-2004.

## Vedlegg B      Utbredelse av drivstofftyper i Norge

Antall kjøretøy i Norge, fordelt på ulike drivstofftyper for perioden 2008 - 2014<sup>18</sup>.

**Tabell B-1** Antall registrerte personbiler etter drivstofftype

Drivstoff	2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent
Bensin	159.6852	72.70%	1.550.434	69.10%	1.500.841	65.00%	1.448.232	61.00%	1.408.198	57.70%	1.368.625	54.80%	1.328.380	52.00%
Diesel	597.391	27.20%	690.56	30.80%	804.384	34.90%	922.986	38.90%	1.025.220	42.00%	1.110.621	44.40%	1.186.194	46.40%
Parafin	21	0.00%	23	0.00%	21	0.00%	20	0.00%	17	0.00%	18	0.00%	16	0.00%
Gass	24	0.00%	24	0.00%	27	0.00%	38	0.00%	36	0.00%	87	0.00%	120	0.00%
Batteri	1.693	0.10%	1.776	0.10%	2.068	0.10%	3.909	0.20%	8.031	0.30%	17.77	0.70%	38.652	1.50%
Annet	126	0.00%	131	0.00%	144	0.00%	180	0.00%	357	0.00%	2.07	0.10%	999	0.00%
SUM	2.196.107	100.00%	2.242.948	100.00%	2.307.485	100.00%	2.375.365	100.00%	2.441.859	100.00%	2.499.191	100.00%	2.554.361	100.00%

**Tabell B-2** Antall registrerte busser etter drivstofftype

Drivstoff	2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent	Antall	Prosent
Bensin	1.344	5.80%	1.049	4.90%	864	4.20%	717	3.70%	578	3.20%	491	2.80%	421	2.50%
Diesel	21.794	93.40%	20.242	94.30%	19.233	94.50%	18.072	93.90%	17.131	94.00%	16.484	93.70%	16.063	93.90%
Parafin	4	0.00%	2	0.00%	2	0.00%	1	0.00%	1	0.00%	1	0.00%	1	0.00%
Gass	152	0.70%	150	0.70%	215	1.10%	400	2.10%	441	2.40%	545	3.10%	565	3.30%
Batteri	10	0.00%	10	0.00%	10	0.00%	10	0.10%	10	0.10%	10	0.10%	9	0.10%
Annet	20	0.10%	21	0.10%	24	0.10%	40	0.20%	59	0.30%	53	0.30%	52	0.30%
SUM	23.324	100.00%	21.474	100.00%	20.348	100.00%	19.24	100.00%	18.22	100.00%	17.584	100.00%	17.111	100.00%

<sup>18</sup> Statistisk Sentralbyrå, "Tabell: 07849: Registrerte kjøretøy, etter kjøringens art og drivstofftype (K)."

## Vedlegg C Branntekniske egenskaper for væsker og gasser brukt som drivstoff i transport

Tabell C-1 Branntekniske egenskaper til ulike drivstoffer<sup>19</sup>

Drivstoff	Flamme-punkt (°C)	Antennelses-temperatur (°C)	Øvre – nedre eksplosjons-grense (%)	Kokepunkt (°C)	Kommentar
Natur-gass	-180	500 – 650	3,8 – 17	88 – 164	Meget lett antennelig og eksplosiv gass.
Propan	-104	412	2,3 – 9,5	42,8	Tyngre enn luft, eksplosive konsentrasjoner kan akkumuleres på lavtliggende steder.
Hydro-gen		594	4 – 75	- 252,8	Lettere enn luft, lett antennelig og har et bredt antennelsesområde.
Bensin	- 43	280	1,4 – 7,6		Meget flyktig og vil lett danne eksplosiv atmosfære ved store utslipp/lekkasjer
Diesel	> 52	256	0.6 – 7.5	180 -360	Liten avdamping i romtemperatur, derfor liten eksplosjonsfare.
Etanol (96%)	17	363	3,3 - 19	78	Brenner med klar/blå (nesten usynlig) flamme, som ikke er lett å oppdage.
Metanol	11	464	6,0 – 36	64	Et utslipp kan lett fortynnes med vann til en ikke-brennbar løsning
Biodiesel	130	200	-	200	Liten avdamping i romtemperatur, derfor liten eksplosjonsfare.

<sup>19</sup> “NFPA 325: Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids.” The Association, 1994.

## Vedlegg D Person- og bygningskader som følge av eksplosjon

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 da oppstår i sammenstøt med fysiske hindringer.

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

	Overtrykk (kPa)	Beskrivelse av skade
Direkte effekt på mennesker <sup>20</sup>	13,8	Grense for skade på trommehinne
	34,5 – 48,3	50 % sannsynlig for skade på trommehinne
	48,3	Grense for indre skader
	68,9 – 103,4	90 % sannsynlighet for skade på trommehinne
	82,7 – 103,4	Grense for lungeblødning
	137,9 – 172,4	50 % dødelighet pga. lungeblødning
	206 – 241,3	90 % dødelighet pga. lungeblødning
	482,6 – 1379	Øyeblikkelig død
Indirekte effekt på mennesker <sup>20</sup>	6,9 – 13,8	Grense for hudskader av splinter
	10,3 – 20	Mennesker blir slått i bakken av trykkbølge
	13,8	Mulig død dersom man blir kastet mot hindringer
	27,6 – 34,5	50 % dødelighet fra splintskader
	48,3 – 68,9	100 % dødelighet fra splintskader
	55,2 – 110,3	Mennesker vil bli kastet flere meter bortover
Effekt på bygninger <sup>21</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>20</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>21</sup> A. E. Cote, J. R. Hall, P. A. Powell, C. C. Grant. "Fire Protection Handbook" 19th edition, Volume 1, Tabell 2.8.1. 2003



## Vedlegg E Thermal runaway

*Thermal runaway*<sup>22</sup> er en prosess der temperaturen i et batteri ukontrollert øker kraftig på grunn av eksoterme reaksjoner. En slik eksoterm reaksjon skjer først når batteriet er opphetet til en viss temperatur.

En temperaturøkning (før thermal runaway), kan skje som følge av:

- Termisk belastning, eksempelvis ved høy omgivelsestemperatur.
- Mekanisk belastning, eksempelvis ved kollisjon i høy hastighet.
- Elektrisk overbelastning, eksempelvis ved overopplading.

Separatoren i et litium-ionbatteri er en porøs film eller membran som slipper igjennom litiumioner. Ved økt temperatur (oftest i temperaturområdet 130 – 150 °C) vil porene lukke seg og stenge av for lading eller utlading av batteriet i cellen, og slik kunne avverge at en varmgang eskalerer. Dersom temperaturen øker signifikant over 150 °C, vil separatoren smelte og dermed tillate direkte kontakt mellom anode og katode. Da vil thermal runaway finne sted innen kort tid.

Hvor alvorlige konsekvenser thermal runaway medfører, avhenger av mange faktorer, blant annet hvor oppladet batteriet er, hvor mye elektrolytt hver celle inneholder, omgivelsestemperatur og batteridesign.

Det verste scenariet oppstår dersom batteriet er fulladet. Følgende prosesser kan da forekomme:

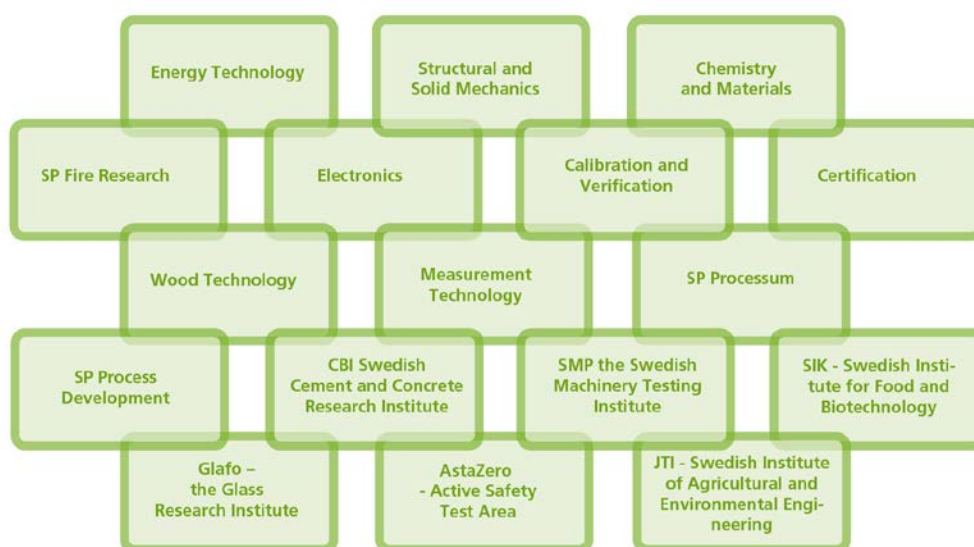
- Økt temperatur i cellen:  
Temperaturer kan lokalt bli opptil 600 °C. Temperaturøkningen skyldes en ukontrollert eksoterm reaksjon ved elektrodene. Varmen kan også føre til en dekomponering av katoden som kan føre til produksjon av små mengder oksygen. Disse mengdene er likevel ikke store nok til å underholde en stor brann. Separatoren vil også kunne smelte og dekomponere.
- Økt indre trykk:  
Økt trykk vil kunne oppstå på grunn av fordamping av elektrolytten, og som følge av gassproduksjon når katodematerialet brytes ned.
- Ventilering:  
Dersom trykket overstiger det battericellen er laget for, vil trykket ventileres ut. Noe elektrolytt vil også ventileres ut sammen med gassen.
- Eventuell antennelse av ventilert gass:  
Gassene som ventileres ut er ofte brennbare, så dersom temperaturen er høy nok og gassen har tilgang på luft, kan ventileringen føre til en liten brann. Denne kan videre antenne den gjenværende elektrolytten.
- Mulig indusering av thermal runaway i naboceller:  
På grunn av den høye temperaturen, kan nærliggende battericeller bli varmet tilstrekkelig opp til at thermal runaway induseres også her. Slik kan en enkelt kortslutning i ytterste konsekvens føre til at hele batteriet tar fyr. Denne prosessen kan også gjøre at en brann blusser opp etter at den er ansett som sløkket.

---

<sup>22</sup> D. H. Doughty, "Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance," National Renewable Energy Laboratory, Albuquerque, New Mexico, USA, Oct. 2012.

## 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, Internett: www.spfr.no  
[www.spfr.no](http://www.spfr.no)

SPFR-rapport A16 20096-1:1  
 ISBN

For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP: [www.sp.se/publ](http://www.sp.se/publ)