

Rapport

Brannsikkerhet og alternative energibærere: Hydrogenkjøretøy i parkeringskjellere

Forfattere:

Andreas Sæter Bøe, Nina K. Reitan



Brannsikkerhet og alternative energibærere: Hydrogenkjøretøy i parkeringskjellere

VERSJON	DATO	
1	2018-03-12	
FORFATTERE		
Andreas Sæter Bøe, Nina K. Reitan		
OPPDRAGSGIVERE	OPPDRAGSGIVERS REF.	
Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap,	Berit Svensen og Jostein W. Grav	
Direktoratet for byggkvalitet	Vidar Stenstad	
PROSJEKTNR.	ANTALL SIDER OG VEDLEGG:	
20319	44 + 3 vedlegg	
SAMMENDRAG		
<p>I denne litteraturstudien har vi undersøkt hvordan norske parkeringskjellere er bygget, og hvilke sikringstiltak som finnes mot brann og eksplosjon. Vi har videre sett på mulige konsekvenser for bygg og mennesker ved hydrogengasseksplasjon, der hydrogen fra en lekkasje akkumuleres og antennes, og ved hydrogentankeksplasjon, der hydrogentanken revner som følge av varmpåkjønning.</p> <p>Hittil er det få gassbiler på norske veier, og det har i liten grad vært vurdert å sikre parkeringskjellere mot gasslekkasjer og en eventuell eksplosjon. Vanlige sikringstiltak for å redusere risikoen ved en eksplosjon, som store avlastningsflater, deteksjon koblet opp mot ventilasjonsanlegg med tilstrekkelig kapasitet, og eksplosjonssikkert, elektrisk utstyr er derfor lite utbredt i eksisterende parkeringskjellere.</p> <p>Små lekkasjerater fra et hydrogensystem (slanger, koblinger) i store romvolum med eksosventilasjon er ikke forventet å resultere i store overtrykk. For større utslipp av hydrogen, der hele tankens innhold slipper ut på kort tid, er det imidlertid fare for omfattende skader. Forsøk som er beskrevet i litteraturen viser at avhengig av parametere, kan 5 kg hydrogen føre til overtrykk i størrelsesorden 10 – 100 kPa. Forsøkene er imidlertid utført i innelukkede rom med et romvolum mindre enn i en parkeringskjeller, og resultatene må derfor benyttes med en viss varsomhet. En hydrogentank som revner ved eksponering av brann vil føre til en kraftig flammeball, og store eksplosjonsskader lokalt.</p> <p>Å beregne sannsynlighet for at ulike scenarier skal inntreffe har ikke vært en del av dette prosjektet. Siden flere mindre sannsynlige hendelser må inntreffe samtidig, er sannsynligheten liten for at store lekkasjer fra tanken skal skje når bilen er parkert i en parkeringskjeller, eller at tanken eksploderer ved eksponering for en brann.</p>		
UTARBEIDET AV	SIGNATUR	
Andreas Sæter Bøe		
KONTROLLERT AV	SIGNATUR	
Anne Steen-Hansen		
GODKJENT AV	SIGNATUR	
Paul Halle Zahl Pedersen		
RAPPORTNR.	GRADERING	GRADERING DENNE SIDE
A18 20319:1	Åpen	Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1	2018-03-12	Første versjon.

Innholdsfortegnelse

Forord	5
Sammendrag	6
Summary in English	8
Definisjoner og forkortelser	10
1 Innledning	11
1.1 Bakgrunn	11
1.2 Målsetting	11
1.3 Avgrensninger	11
1.4 Metode	12
2 Hydrogen som energibærer i bil	13
2.1 Hydrogenbilen	13
2.2 Trykkavlastningsventilen på hydrogentanken	13
2.3 Eksplosjon knyttet til hydrogen	15
3 Parkeringskjellere og hydrogen	17
3.1 Norsk regelverk og byggemåte	17
3.2 Tiltak for å redusere eksplosjonsrisiko	18
4 Hydrogenlekkasje i innelukkede rom	21
4.1 Hydrogengassens egenskaper	21
4.2 Potensielt hendelsesforløp ved innendørs hydrogenlekkasje	21
4.3 Akkumulering av hydrogen	22
5 Konsekvenser ved eksplosjon	23
5.1 Konsekvenser når materiell utsettes for eksplosjonstrykk	23
5.2 Konsekvenser når mennesker utsettes for eksplosjonstrykk	27
5.3 Konsekvenser ved varmeeeksponering av mennesker	28
6 Sammenfatning av relevante studier på hydrogensikkerhet	30
6.1 Eksempler på gjennomførte EU-prosjekter knyttet til hydrogensikkerhet	30
6.2 Eksempler på studier innenfor relevante temaer	30
6.3 Sannsynlighet for en hendelse med hydrogenkjøretøy	35
7 Diskusjon	36

7.1	Brann- og eksplosjonssikring av eksisterende, norske parkeringskjellere	36
7.2	Vurdering av skadepotensiale	37
7.3	Risiko for eksplosjon	39
7.4	Begrensninger ved å bruke tabeller for å beregne sikkerhetsavstander?	40
7.5	Veien videre	40
8	Konklusjon	41
	Referanser	42
A	Akkumulering og fortynning av hydrogen	
B	Sikkerhetsavstander til hydrogen jetbrann	
C	Sikkerhetsavstander ved revning av hydrogentank	

Forord

RISE Fire Research har siden 2015 studert utfordringer knyttet til brannsikkerhet og alternative energibærere i kjøretøy. Denne rapporten presenterer et litteraturstudium som er gjennomført på oppdrag fra Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). Geir Drangsholt fra TekØk rådgivning AS har bidratt med innhenting av informasjon og regelverk for eksisterende parkeringskjellere, mens professor Dag Bjerketvedt fra Høgskolen i Sørøst-Norge har bidratt med kompetanse på eksplosjon.

Prosjektet er en videreføring av litteraturstudien «Brannsikkerhet og alternative energibærere: Gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere» [1].

Sammendrag

Hydrogen er i ferd med å etablere seg som energibærer i Norge ved at biler, busser, lastebiler og båter i stadig større grad skal benytte hydrogen som drivstoff. Samtidig vil det være et økende behov for underjordiske parkeringsanlegg under større bygg, som f.eks. tilknyttet boliger, forretningsvirksomhet og idretts- og kulturbygg. Siden eksisterende parkeringskjellere i utgangspunktet ikke er bygget med hensyn til den risikoen et hydrogenkjøretøy medfører, er det viktig å undersøke hvor godt tilpasset de er hvis det skulle oppstå en hendelse som involverer hydrogen.

I denne litteraturstudien har vi undersøkt hvordan norske parkeringskjellere er bygget, og hvilke sikringstiltak som finnes mot brann og eksplosjon. Vi har videre sett på mulige konsekvenser for bygg og mennesker ved hydrogengasseksplasjon, der hydrogen fra en lekkasje akkumuleres og antennes, og ved hydrogentankeksplasjon, der hydrogentanken revner som følge av varmpåkjenning.

Norske parkeringskjellere er bygget over flere tiår, og på grunn av endring i regelverket, varierer eksisterende parkeringskjellere med hensyn til størrelse, geometri og hvilke sikringstiltak som er installert. Hittil er det få gassbiler på norske veier, og det har i liten grad vært aktuelt å sikre parkeringskjellere mot gasslekkasjer og eventuell eksplosjon. Vanlige sikringstiltak for å redusere risikoen ved en eksplosjon, som avlastningsflater beregnet ut fra forventet eksplosjonstrykk, deteksjon koblet opp mot et ventilasjonsanlegg med tilstrekkelig kapasitet, og eksplosjonssikkert, elektrisk utstyr er derfor ikke utbredt i eksisterende parkeringskjellere.

I dette prosjektet har vi valgt å undersøke konsekvensene av to potensielt alvorlige hendelser; den ene er en lekkasje fra en hydrogentank, mens den andre er at tanken revner under varmeeksponering. Det er ikke beregnet sannsynlighet for at disse to scenariene skal skje, men begge scenariene krever at en rekke mindre sannsynlige hendelser må inntreffe samtidig. Dette underbygger at sannsynligheten for at disse hendelsene skal inntreffe er liten.

Når det gjelder lekkasje fra tanken, så kan dette skje på ulike måter, men den mest alvorlige lekkasjen er dersom trykkavlastningsventilen skulle løse ut i et innelukket rom, uten at dette skyldes en ekstern brann. Da vil hele tankens innhold slippe ut i løpet av få titalls sekunder, og det vil kunne ta lang tid for et ventilasjonsanlegg å fortynne gasskyen. Hvis gassen ikke antenner umiddelbart, kan den, under gitte betingelser, samle seg opp og antennes etter en stund, noe som kan føre til en eksplosjon. Det er utført en rekke eksplosjonsforsøk og simuleringer med hydrogen i mindre romvolum (opp til ca. 120 m³). Disse viser at under verst tenkelige forhold kan en hydrogenmengde på opp til 5 kg føre til overtrykk i størrelsesorden 100 kPa. Dette vil føre til omfattende materielle skader i nærheten av eksplosjonen, og kritiske personskader eller død for personer som befinner seg i nærheten. Samtidig er det vist at den samme hydrogenmengden under andre forhold, eksempelvis ved mindre grad av innelukkning, færre obstruksjoner, større romvolum, eller større avlastningsflater kan resultere i langt lavere overtrykk (< 10 kPa), som mest sannsynlig ikke vil føre til alvorlige skader verken på bygninger eller mennesker. De mest alvorlige skadene er forventet når det er en større mengde hydrogen tilstede, der konsentrasjonen er høyere enn 10 %.

Mindre lekkasjer fra for eksempel slanger eller koblinger kan også føre til en brennbar gassblanding, men i store romvolum er det ikke forventet at konsentrasjonen blir høy nok til at dette gir alvorlige overtrykk. Mindre lekkasjer kan likevel føre til at hydrogen samler seg opp i små lommer, f.eks. under panseret på en bil, og resultere i en mindre eksplosjon hvis gassblandingen blir antent.

Dersom en hydrogentank blir utsatt for varmeeksponering, vil trykket i tanken øke, og tankveggen svekkes mekanisk. Etter en viss tid skal trykkavlastningsventilen smelte og slippe ut gassen. For CNG-tanker har det vært enkelte hendelser der trykkavlastningsventilen ikke har blitt utløst, og tanken har til slutt revnet. Hydrogentanker er testet mot en strengere standard enn CNG-tanker, og det er derfor grunn til å tro at denne feilen sjeldnere vil inntreffe for hydrogentanker. Likevel, om tanken skulle revne, vil dette resultere i en kraftig flammeball og høyt trykk i nærheten av eksplosjonsstedet. Det er imidlertid viktig å påpeke at trykkbølgen i hovedsak skyldes trykket fra gassen som opprinnelig var lagret på tanken, og ikke en rask forbrenningsreaksjon, og den vil ikke kunne nå samme trykk som når gassen er forblandet med luft. Siden dette scenariet er avhengig av at det er en brann tilstede, vil det å ha et automatisk slukkeanlegg installert redusere sannsynligheten for hendelsen.

Summary in English

Hydrogen is about to be established as an energy carrier in Norway, and cars, buses, trucks and ferries powered by hydrogen fuel cells will be more common in use. In the coming years there will be an increasing demand for underground car parks, for example in connection to blocks of flats, business, sports and culture centers. Since existing car parks initially were not built with regard to the risk represented by hydrogen vehicles, it is important to study how robust the buildings would be against a hydrogen related accident.

In this literature survey we have studied how Norwegian car parks are built with regard to fire and explosion safety. We have described consequences for humans and buildings in case of a hydrogen explosion (leakage with subsequent ignition) and a hydrogen tank explosion (the hydrogen tank bursts due to heat exposure).

Existing Norwegian car parks have been built over several decades, and due to change in regulations, they hold a variety of sizes, geometries and installed safety measures that are installed. Until now there have only been a few gas vehicles on the roads, and protection of car parks against gas leaks and explosions has not been considered as relevant. Standard safety measures for reduction of explosion risks, like deflagration venting, gas detection linked to a ventilation system with sufficient capacity, and electrical equipment approved for use in an explosive atmosphere are not common in existing car parks.

In this project we have evaluated the consequences of a hydrogen leak, and a hydrogen tank explosion due to malfunctioning pressure relief device. The probability of these events are not determined in the current project, but since these events requires several events to happen simultaneously, the probability is assumed to be low.

Regarding leakages from the tank, this can happen in different ways. The most severe leakage is if the pressure relief device opens in a confined space, without being activated by an external fire. In that case the entire amount of hydrogen stored in the container will be released in tens of seconds, and it may take a long time for a ventilation system to dilute the gas cloud. If the gas does not ignite immediately, it may, under certain conditions, accumulate and ignite after a while, which may cause an explosion. Several practical experiments and simulations have previously been performed with hydrogen in small, confined spaces (up to ca. 120 m³). The results indicate that in the worst-case scenario, the overpressure may reach an order of size of 100 kPa. Such overpressures will cause comprehensive material damages and critical personal injuries or death for people close by. However, the results show that under different circumstances, like a less confined room, fewer obstacles, a larger volume or larger deflagration ventings, the overpressure can be reduced to a value (<10 kPa) that probably will not cause serious damage to people or affect the building significantly. The most severe damages are expected when the hydrogen concentration is above 10 %.

Minor leaks from tubes or fittings may also lead to flammable gas mixtures. However, in large volumes it is not expected that the concentration will reach a level that is high enough to cause severe overpressures. Hydrogen gas from minor leaks may still accumulate in small

confinements, like under the bonnet of a car, and may cause a small explosion if the gas is ignited.

If the hydrogen tank is exposed to heat, the pressure in the tank will increase, and the integrity of the tank wall will be weakened. To avoid rupture of the tank, the pressure relief device should open and release the gas. For CNG-tanks there have been incidents where the pressure relief devices have failed to open when they were supposed to, and the tanks have exploded. Hydrogen tanks are tested against a more strict fire test standard, and they are therefore believed to be more robust against such faults. If the hydrogen tank nevertheless should explode, this would cause a large flame ball and a high local overpressure. It is, however, important to pinpoint that the overpressure mainly would be caused by the pressure in the gas originally stored in the hydrogen tank, and would not be caused by a rapid combustion. The pressure will therefore not reach a level as if the hydrogen were premixed with air and then ignited. Since this scenario depends on a fire to occur first, the probability for it to take place will be reduced if the car park has an automatic extinguishment system installed.

Definisjoner og forkortelser

ATEX: ATEX består av to EU-direktiver. Det ene stiller krav til tiltak/dokumentasjon i eksplosjonsfarlig område, og det andre er et produktdirektiv som stiller krav til utstyr som skal benyttes i eksplosjonsfarlige områder, inkludert utstyr som er designet for å forhindre eksplosjoner.

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.

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

DNV: Det norske veritas.

Eksplosjonsgrense: Se brennbarhetsgrense.

Fysisk eksplosjon: En fysisk eksplosjon er en plutselig utløsning av mekanisk energi. En hydrogentank som revner er et eksempel på dette.

Gasseksplosjon: En gasseksplosjon er forbrenning av en brennbar gassblanding, der den hurtige forbrenningsreaksjonen fører til et overtrykk. Dersom det oppstår en gasslekkasje, og gassen akkumuleres til konsentrasjon som er mellom nedre og øvre eksplosjonsgrense, kan gasskyen antennes.

Nomogram: Todimensjonalt diagram der en funksjon kan beregnes grafisk.

Risiko: I denne rapporten er risiko definert som *sannsynlighet multiplisert med konsekvens*.

Støkiometrisk blanding: Blanding av kjemiske reaktanter der blandingsforholdet er i overensstemmelse med den spesifikke kjemiske reaksjonsligningen.

Tankeeksplosjon: Dersom en gasstank varmes opp, vil trykket øke, og materialet i tanken vil svekkes mekanisk. Dersom gasstankens sikkerhetsmekanismer (jfr. TPRD) ikke løser ut, kan det skje en fysisk eksplosjon.

TPRD: *Temperature Pressure Relief Device* er en temperaturfølsom trykkavlastningsventil som er montert på hydrogentanken. Denne åpnes dersom tanken og ventilen blir utsatt for en kraftig varmpåkjenning, for eksempel en brann.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

RISE Fire Research har siden 2015 studert problemstillinger knyttet til økende bruk av alternative energibærere i transportsektoren og brannsikkerhet i innelukkede rom, som eksempelvis parkeringskjellere og tunneler [2]–[5]. Behovet for å parkere kjøretøy under bakken vil øke, og det er viktig at parkeringskjellere er bygget slik at dette ikke går på bekostning av brann- eller eksplosjonssikkerheten. Til tross for at det foreløpig er få hydrogenkjøretøy på veiene, er hydrogen som energibærer på vei til å etablere seg på det norske markedet. I Norge har vi erfaring fra en rask vekst i antall elbiler. Denne har lært oss at hvis det oppstår en brann i et kjøretøy, så kan manglende kunnskap, f.eks. med hensyn til slukkeinnsats eller risiko ved parkering under bakken, medføre bekymring og restriksjoner som kan unngås ved bedre kunnskap. Hydrogen som energibærer i transportsektoren innebærer ikke nødvendigvis en høyere risiko enn konvensjonelt drivstoff (bensin og diesel), men har andre egenskaper som kan gi andre typer risikoer. Tilstrekkelig kunnskap om risiko ved parkering av hydrogenkjøretøy under bakken bør derfor etableres i en tidlig fase.

1.2 Målsetting

Prosjektet har hatt som målsetting å undersøke hvilke konsekvenser som kan oppstå ved en hydrogentank- og hydrogengasseksplasjon i en typisk, norsk parkeringskjeller. Følgende spørsmål er derfor forsøkt besvart:

1. Hvordan er eksisterende parkeringskjellere i Norge bygget med hensyn til brann- og eksplosjonsrisiko?
2. Hvilke overtrykk kan oppstå i en typisk, norsk parkeringskjeller fra en hydrogentank- eller hydrogengasseksplasjon?
3. I hvilken grad er bygningene tilpasset å motstå en hydrogentank- og hydrogengasseksplasjon?
4. Hvilke konsekvenser kan en hydrogentank- eller hydrogengasseksplasjon ha for bygningskonstruksjon og mennesker i nærheten?

1.3 Avgrensninger

Vi har gjort følgende antakelser:

- En hydrogenlekkasje finner sted.
- Hydrogenbeholderen inneholder ca. 5 kg hydrogen.
- Det finnes tennkilder i nærheten.
- Det antas at lekkasjen finner sted i et innelukket rom.

Sannsynligheten for at en lekkasje kan oppstå, eller at en hydrogentank i et kjøretøy eksploderer som følge av brann, er knyttet til kjøretøyets komponenter og materialer, samt om det finnes tennkilder i nærheten. Dette vil variere for type og alder av kjøretøy, og er informasjon som er vanskelig å innhente. Det finnes heller ikke tilstrekkelig historikk på

hendelser som involverer hydrogenkjøretøy, og estimering av sannsynligheter vurderes derfor til å være utenfor rammene til dette prosjektet.

1.4 Metode

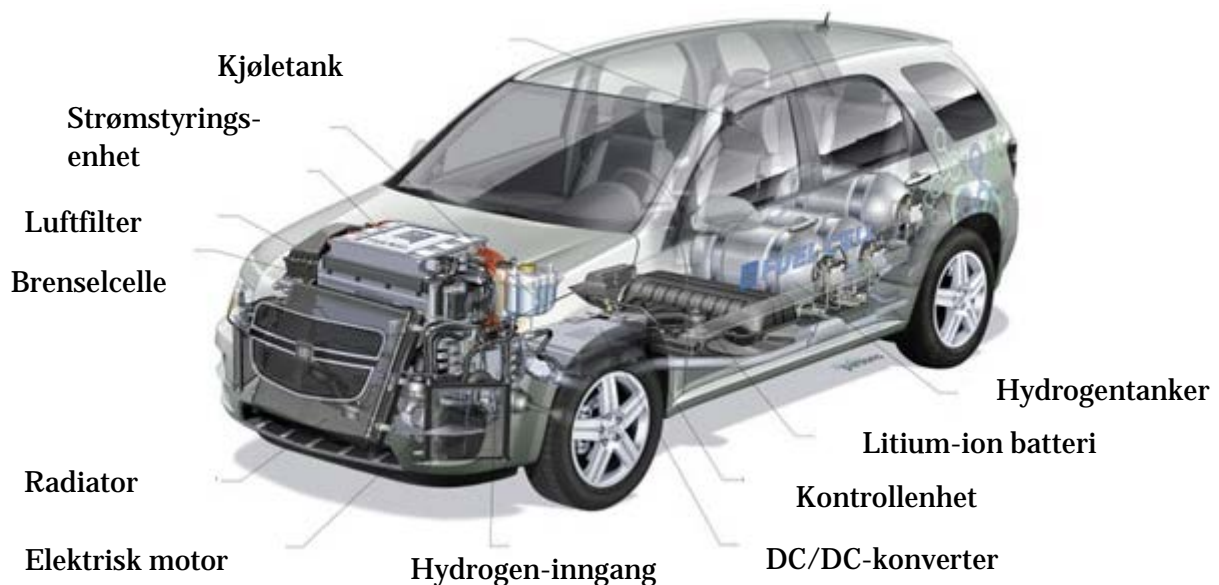
Informasjon er blitt innhentet på følgende måte:

- Eksisterende og tidligere byggeforskrifter tilbake til 1949 er gjennomgått for å gi et bilde av hvordan eksisterende parkeringskjellere er bygget, og hvilke sikkerhets-systemer de har.
- Et litteraturstudie er gjennomført med fokus på:
 - o Lekkasje og antennelse av hydrogen i innelukkede rom.
 - o Skader på bygg og mennesker ved ulike eksplosjonstrykk.

2 Hydrogen som energibærer i bil

2.1 Hydrogenbilen

De viktigste komponentene til et hydrogenkjøretøy er hydrogentanken, brenselcellen og batteriet (se Figur 2-1). En personbil vil typisk ha en hydrogenmengde på ca. 5 kg som er lagret i en tank som er trykksatt til 700 bar. Hydrogen og oksygen omdannes til strøm og vann i en brenselcelle. Strømmen driver elektromotorer som sørger for framdrift av bilen.



Figur 2-1 Illustrasjonsbilde av hvordan et hydrogenkjøretøy er bygget opp. Illustrasjonen er hentet fra Wikimedia Commons, men oversatt til norsk.

2.2 Trykkavlastningsventilen på hydrogentanken

2.2.1 Funksjon

Hydrogentanken er utstyrt med en TPRD (temperature pressure relief device), som er en temperaturfølsom trykkavlastningsventil som skal hindre at hydrogentanken revner dersom den blir utsatt for varmpåkjenning. Formålet er å tømme tanken for gass før den blir varmet opp og mister sin mekaniske stabilitet.

En TPRD er en enveisventil som løser ut ved at en smeltesikring smelter ved 110 °C. Når ventilen er blitt åpnet, så forblir den åpen og tømmer hele tankens innhold ut i omgivelsene. Hvor raskt tanken tømmes bestemmes av trykket i tanken og diameteren til ventilen. Diameteren og plasseringen til en TPRD påvirker størrelsen og retningen til gasstrømmen som dannes. Vedlegg B beskriver en framgangsmåte for hvordan sikkerhetsavstander for denne type scenario kan estimeres.

Det er forventet at en TPRD utløser ved en brann. Likevel har det vært flere innrapporterte hendelser om at den ikke har fungert som forventet. I hovedsak er det to typer feil som kan oppstå:

1) Trykkavlastningsventilen løser ikke ut når den skal

Det finnes flere eksempler på at en TPRD ikke har løst ut når den burde. De innrapporterte feilene vi kjenner til av denne typen, har skjedd for tanker med CNG (Compressed Natural Gas). Standarden [6] som CNG-tanker testet etter åpner i større grad opp for at denne typen feil kan skje, enn standarden for testing av hydrogen-tanker [7]. Dette gir grunn til å tro at denne type feil vil inntreffe sjeldnere for hydrogen-tanker. Årsaken til denne typen feil er eksempelvis at en gasstank eksponeres av brann kun på én side, slik at tanken blir utsatt for en lokal varmepåkjenning uten at ventilen varmes tilstrekkelig opp til å løse ut. Dette kan medføre at tanken revner. Det har også skjedd at ventilen har blitt nedkjølt under brannvesenets slokkearbeid, og på den måten ikke har løst ut når den egentlig skulle [8]–[10].

En feil som resulterer i at tanken revner gir en fysisk eksplosjon, og blir i denne rapporten omtalt som en hydrogentankeeksplosjon.

2) Trykkavlastningsventilen løser ut når den ikke skal

Hvis en TPRD løser ut når den ikke skal, kan ulike scenarier finne sted. Gassen kan enten fortynnes til en ikke-eksplosiv blanding, antennes umiddelbart eller akkumuleres og antennes på et senere tidspunkt. Figur 4-1 viser et hendelsesdiagram over potensielle utfall ved utslipp av hydrogen i et rom.

Det at hydrogen lekker ut, danner en gassky og antenner, fører til en kjemisk forbrenningsreaksjon, og blir i denne rapporten omtalt som en hydrogengasseksplosjon.

I tillegg til feil på TPRD kan det oppstå lekkasjer fra koblinger eller pakninger. I 2011 førte en ødelagt pakning på en hydrogentank i en gaffeltruck til at hele tankens innhold ble sluppet ut i løpet av ti minutter i forbindelse med fylling [11]. I dette tilfellet ble ikke gassen antent, og ingen ble skadet. En bredere innføring av hvordan en TPRD fungerer, og kjente hendelser der den ikke har fungert, finnes i referanse [12].

2.2.2 Størrelse og utslippsrate på TPRD

Det finnes per i dag ingen felles standard for hvor stor diameteren på en TPRD skal være, men normalt er den ca. 5 mm [13]. Denne størrelsen er valgt med den hensikt å kunne tømme tanken hurtig i tilfelle tanken blir eksponert for varme fra en brann. En TPRD med en diameter på 5 mm vil tømme en tank med 5 kg hydrogen på rundt 30 sekunder, med en synkende utslippsrate fra en initiell rate på 0,8 kg/s [14]. En høy utslippsrate er uheldig på flere måter. Blant annet presenterer Brennan og Molkov [13] fenomenet *pressure peaking phenomenon*, som innebærer at overtrykket i et rom øker som følge av at en stor mengde gass blir frigjort på kort tid. Dette overtrykket dannes ikke av en eksplosjon, men skyldes økt gassmengde i rommet. De samme forskerne foreslår å redusere TPRD-diameteren for å unngå at fenomenet oppstår. En mengde hydrogengass på 5 kg tilsvarer et volum på ca. 60 m³. I et innelukket, mindre volum vil et slikt utslipp kunne skape et kraftig overtrykk. For parkeringskjellere med

større volum, vil dette fenomenet bli mindre gjeldende, ettersom den tilførte mengden gass utgjør en liten del av totalvolumet, og føre til kun en mindre trykkøkning.

TPRD-diameteren påvirker både hvor raskt gassen slipper ut, hastigheten på den, og hvor langt gassen når ut i rommet. Dette vil påvirke lengden til en jetflamme og utbredelsen av en flammeball som oppstår ved umiddelbar antennelse av et gassutslipp. Økende diameter gir større utbredelse, se vedlegg B og C for mer utfyllende informasjon.

Eksperimenter og gjennomgang av ulykker har vist at plutselige hydrogenutslipp kan selvantenne [15]. En innføring i hvilke mekanismer som forårsaker dette er gitt i [16]. Både eksperimentelle studier og numeriske beregninger indikerer at trykk, diameter og lengde på TPRD-en er faktorer som påvirker sannsynligheten for selvantennelse.

Dersom en liten lekkasje over lengre tid finner sted, er det mulig å hindre at konsentrasjonen akkumulerer til en eksplosiv blanding, ved hjelp av ventilasjon og deteksjon [17]. Ved en større lekkasje er dette vanskeligere. Dersom hele tankens innhold slipper ut i løpet av 30 sekunder rekker ikke nødvendigvis sensorer å registrere at det er hydrogen i rommet. Resultatet blir at en stor del av gasskyen har en høyere konsentrasjon enn nedre eksplosjonsgrense (4 %), og det er sannsynlig at deler av gasskyen har en konsentrasjon nær støkiometrisk blanding (ca. 30 %). Ved å la gassen tømmes fra beholderen over en lengre tidsperiode, vil gassen ha bedre tid til å spre seg utover i rommet. En detektor har bedre tid til å registrere at det er gass tilstede, og et ventilasjonsanlegg vil ha bedre mulighet til å fortynne gassen, og dermed bidra til at mer av gassen befinner seg i en konsentrasjon under nedre eksplosjonsgrense.

I det nylig avsluttede EU-prosjektet FireComp [18], ble det utført flere brannforsøk, der trykktanker med ulike trykk ble eksponert for ekstern varme. Resultatene viste at i motsetning til metallbeholdere (som brukes ved lavere trykk), økte ikke trykket i komposittankene vesentlig mye i perioden før tankene revnet, kun ca. 2 % (ca. 15 bar). Dette var komposittanker som i utgangspunktet har en sikkerhetsfaktor på 2 – 3, som betyr at trykket i tanken skal kunne øke 2 – 3 ganger før tanken revner. Testene viser altså at tankene ikke hovedsakelig revnet på grunn av for høyt trykk, men fordi komposittankenenes styrke ble svekket. Ved 700 bars trykk revnet beholderne etter ca. 4 minutter. I en tilsvarende test med lavere trykk, 525 bar, revnet tanken etter litt over 5 minutter. Ved enda lavere trykk, 250 og 110 bar, oppstod det en lekkasje henholdsvis etter ca. 7 og 8 minutter. I de sistnevnte tilfellene oppstod det kun en lekkasje fra tanken, ingen revning. Disse forsøkene indikerer at det ikke nødvendigvis er behov for å avlaste trykket så raskt som tilfellet er med en 5 mm TPRD. Ved å velge en TPRD med mindre diameter, vil trykket avlastes mer gradvis, og gasskyen har bedre tid til å spre seg utover i rommet og fortynnes. Sikkerhetsavstandene som redningspersonell må ha for å unngå å bli truffet av en jetbrann vil også reduseres ved en mindre TPRD.

2.3 Eksplosjon knyttet til hydrogen

Det er i hovedsak to ulike typer eksplosjoner som kan involvere en hydrogentank. Det første scenariet er at hydrogen lekker ut fra tanken. Dersom hydrogenskyen som oppstår samler seg

opp med en konsentrasjon over nedre eksplosjonsgrense¹ kan denne hydrogenskyen antennes. Under visse forhold kan forbrenningen skje så raskt at det skapes et kraftig overtrykk. En slik eksplosjon omtales i denne rapporten som en hydrogengasseksplosjon.

Det andre scenariet som kan oppstå, er revning av hydrogentanken. I dette tilfellet vil det oppstå en kraftig flammeball og høye trykk i nærheten av eksplosjonsstedet. Det er imidlertid viktig å merke seg at dette er en såkalt fysisk eksplosjon, der trykket som oppstår i hovedsak skyldes det høye trykket som opprinnelig var på hydrogentanken, og ikke en rask forbrenning som ved en hydrogengasseksplosjon. I denne rapporten omtales denne typen eksplosjon som en hydrogentankeeksplosjon.

Ved en hydrogentankeeksplosjon viser forsøk at den mekaniske energien i form av trykk er i størrelsesorden 1/10 av tilgjengelig kjemisk energi [19].

Les mer om hydrogengass- og hydrogentankeeksplosjoner i kapittel 6.2.

¹ Konsentrasjonen må også være nedenfor *øvre eksplosjonsgrense*. Siden denne er såpass høy (75 %), vil konsentrasjonen sjelden være over dette.

3 Parkeringskjellere og hydrogen

3.1 Norsk regelverk og byggemåte

Parkeringskjellere i Norge er bygget over flere tiår i henhold til den tids regelverk, og varierer med tanke på geometri, grad av innelukking og sikringstiltak mot brann.

Tabell 3-1 viser en oversikt over krav til parkeringskjellere i ulike perioder fra 1949 frem til i dag. Oppsummert har de preaksepterte ytelseskravene til parkeringsanlegg i løpet av perioden 1985 – 2017 variert som følger:

- I perioden 1985 – 1997 var det tillatt å føre opp lukkede parkeringsanlegg under bakkeplan på inntil 1200 m² uten bruk av automatiske slokkeanlegg. Tilsvarende anlegg over bakkeplan kunne føres opp med en grunnflate inntil 3600 m² uten bruk av automatiske slokkeanlegg.
- I perioden 1997 – 2010 måtte det preakseptert enten etableres røykventilasjon eller sprinkleranlegg i samme type parkeringsanlegg når grunnflaten oversteg 1200 m² uavhengig av om parkeringsanlegget var under eller over bakkeplan. For en branncelle over to plan med samlet grunnflate > 800 m² var det krav om at arealene ble beskyttet med automatisk slokkeanlegg.
- Etter 2010 gjaldt kravet om brannalarmanlegg for parkeringsanlegg med samlet bruttoareal større enn 1200 m². Alternativt kunne det installeres et automatisk slokkeanlegg. I parkeringsanlegg med bruttoareal mindre enn 400 m² eller med automatisk slokkeanlegg, var det tilstrekkelig med normal ventilasjon.
- Etter 2010 må automatiske garasjeanlegg ha egnet automatisk slokkeanlegg med minst 60 minutters operasjonstid.
- De aller fleste parkeringskjellere er plasstøpte konstruksjoner av armert betong i vegger, tak og dekke.

I praksis betyr dette at få, om noen, parkeringsanlegg med grunnflate < 400 m² har installert automatiske slokkeanlegg eller brannalarmanlegg². Få, om noen, garasjeanlegg eller parkeringsanlegg (parkeringskjellere) med grunnflate < 1200 m² bygget før 2010 har installert automatiske slokkeanlegg eller brannalarmanlegg. I perioden 1985 – 1997 må det påregnes å ha blitt oppført lukkede garasjeanlegg over bakkeplan med grunnflate < 3600 m² uten automatiske slokkeanlegg.

I veiledningen til TEK10 [20] ble det gitt åpning for at mangel på automatiske slokkeanlegg kunne erstattes med røykventilasjon. Med ytelsesnivået som er skissert i TEK10, er det imidlertid et fåtall parkeringskjellere som er utstyrt med dette. De aller fleste anleggene er utstyrt med eksosventilasjon, men denne har for lav kapasitet til å håndtere røykmengden som produseres ved en brann.

Regelverket har i mange år stilt følgende krav til eksplosjonssikring. Byggverk der den forutsatte bruken kan medføre fare for eksplosjon, skal prosjekteres og utføres med

² Et brannalarmanlegg varsler normalt kun med en sirene lokalt på stedet, men varsler i noen tilfeller direkte til brannvesen.

avlastningsflater, slik at personsikkerheten og bæreevnen opprettholdes på et tilfredsstillende nivå.

Alle parkeringskjellere har minst en trykkavlastningsflate gjennom portåpningen, men så vidt vi kjenner til er ingen eksisterende parkeringskjellere bygget med hensyn til å motstå trykk fra en eksplosjon.

3.2 Tiltak for å redusere eksplosjonsrisiko

Risikoreduserende tiltak ved eksplosjon kan grovt deles inn i tiltak som reduserer sannsynligheten for at en eksplosjon skal finne sted, og tiltak som reduserer konsekvensene av en eksplosjon.

Ventilasjon

Ventilasjon er det mest benyttede tiltaket for å hindre at hydrogen lagret i et rom akkumulerer til en eksplosiv blanding [21]. Ventilasjon bidrar ved å:

- Redusere sannsynligheten for at en eksplosiv atmosfære oppstår.
- Redusere volumet av en eksplosjon atmosfære.
- Redusere varigheten (tid) av en eksplosiv atmosfære.

Ventilasjon er altså et tiltak som i hovedsak reduserer sannsynligheten for at en eksplosjon skal finne sted. Ventilasjon kan være naturlig eller mekanisk.

FM Global [22] anbefaler minimum 10 LUT, med mulighet til å øke til 25 LUT ved deteksjon av hydrogen.

Deteksjon brukes gjerne i tilknytning til ventilasjon. I eksplosjonsfarlige områder er det anbefalt å ha en kontinuerlig bakgrunnsventilasjon med mulighet til å sette på en nødventilasjon. Nødventilasjon aktiveres enten manuelt eller ved signal fra detektoren. Ventilasjonsvifter må være godkjent for å kunne brukes i en eksplosiv atmosfære.

Mekanisk ventilasjon er påbudt i form av eksosventilasjon, og fører til en kontinuerlig utskiftning av luft for å hindre at eksos samler seg opp i anlegget. Det finnes også enkelte parkeringskjellere som har røykventilasjon.

Fjerne antenneskilder

Å fjerne antenneskilder er en annen måte å redusere sannsynligheten for at en eksplosjon finner sted. I en parkeringskjeller kan dette hovedsakelig gjøres ved å sørge for at elektriske komponenter som lys, vifter m.m. er i henhold til ATEX-direktivet. Dette vil redusere antallet antenneskilder, men vil likevel ikke kunne eliminere muligheten for antennelse, siden en jetstrøm av hydrogengass kan selvantenne. Statisk elektristet lagret i personers klær eller elektriske komponenter i biler vil også kunne være antenneskilder, og det vil derfor aldri være mulig å eliminere alle antenneskilder.

Byggets robusthet og avlastningsflater

Det er viktig at et bygg som skal kunne motstå trykkbølgene fra en eksplosjon har en solid rammestruktur som holder tak og mellomliggende gulv på plass, og at eventuelle bæresøyler

er godt forankret i gulv og tak. For personsikkerheten er det kritisk at bygget bevarer sin integritet og ikke kollapser delvis eller fullstendig.

Om en bæresøyle slås over ende, bør konstruksjonen være designet slik at kreftene i bærekonstruksjonen omlagres i den øvrige konstruksjonen. For plassbygde betongkonstruksjoner, vil skadepunktet kunne være avgjørende for om det oppstår en kollaps, eller om kreftene kan omlagres. I plasstøpte konstruksjoner vil (avhengig av måten den er armert på) en eksplosjonslast kunne skade lokalt, eller i et større omfang, slik at det oppstår lokal sammenrasing, kun nedbøyning, eller lokale knusningsskader som ikke påvirker den totale bæreevnen.

I tillegg til at rammestrukturen må være solid bygget, er det en fordel at enkelte overflater er lett forankret, og på den måten kan fungere som trykkavlastningsflater. Det anbefales å benytte vegger med flatevekt 10 kg/m² dersom de skal kunne fungere som trykkavlastende elementer. Vegger med flatevekt 30 – 50 kg/m² er for tunge til å gi en signifikant reduksjon av overtrykket, men en liten reduksjon er likevel forventet [23].

En typisk portåpning til en parkeringskjeller er ca. 4-5 m bred og 2,2 – 2,5 m høy. Denne åpningen vil fungere som en avlastningsflate både med og uten lukket port, men effekten vil være størst dersom porten er åpen. Porter som typisk installeres i parkeringskjellere veier fra rundt 100 – 150 kg³, og har en flatevekt på 10 – 15 kg/m², og vil derfor til en viss grad fungere som trykkavlastende flater selv om de skulle være lukket. Om en lukket port skulle bli blåst av som følge av trykket, vil den kunne skade personer i nærheten.

De fleste private parkeringskjellere (for eksempel knyttet til et borettslag) har normalt kun én port, som brukes både til inn- og utkjøring. Parkeringskjellere tilknyttet kjøpesentre eller offentlige tilkomststeder har ofte åpne porter, og her kan det være atskilte inn- og utkjøringer.

Standardene BS-EN 14797:2006 «Explosion venting devices» [24], BS-EN 14994:2007 «Gas explosion venting protective systems» [25] og NFPA 68 «Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting» [26] gir retningslinjer for hvordan avlastningsflater kan designes for gassesplosjoner, men disse er ikke laget spesielt for hydrogen, og må derfor brukes med varsomhet.

³ Informasjon fra Hörmann Norge.

Tabell 3-1 Oversikt over krav til parkeringskjellere i ulike tidsperioder [20], [27]–[34]

År	Maksimal størrelse uten brannseksjonering			Krav til overflater	Krav til brannalarmanlegg	Krav til røykventilasjon	Krav til automatisk slokkeanlegg
1949- 1984	10 biler eller 200 m ²			Brannfast materiale	Ikke påkrevd	Kun i spesielle tilfeller	Kun i spesielle tilfeller
1985- 1996	3600 m ² (lukket) eller 5400 m ² (åpen)				I lukket garasje > 1200 m ²	I lukket garasje over jorden > 1800 m ²	I lukket garasje under jorden > 1200 m ² , og lukket garasje over jorden > 3600 m ²
1997- 2009				B-s1,d0 > 200 m ²	Ved areal > 1200 m ² (1,2)	Ingen krav	Ved areal > 1200 m ² (3)
2010-2016	Normalt: 1200 m ²	Med brann- alarmanlegg: 1800 m ²	Med sprinkler – anlegg: 10 000 m ²	B-s1,d0 > 200 m ²	Ved areal > 1200 m ² (1,2)	Ved areal > 400 m ² (min. 1 m/s)	Krav først fra 1800 m ² , men i praksis fra 400 m ²

(1) Krav bortfaller dersom automatisk slokkeanlegg er installert.

(2) Krav bortfaller i parkeringsanlegg der mer enn 1/3 av veggflatene på hvert plan åpne mot det fri over ferdig planert terreng, og øverste parkeringsflate er mindre enn 16 m over gjennomsnittlig planert terreng.

(3) Krav bortfaller dersom brannalarmanlegg er installert.

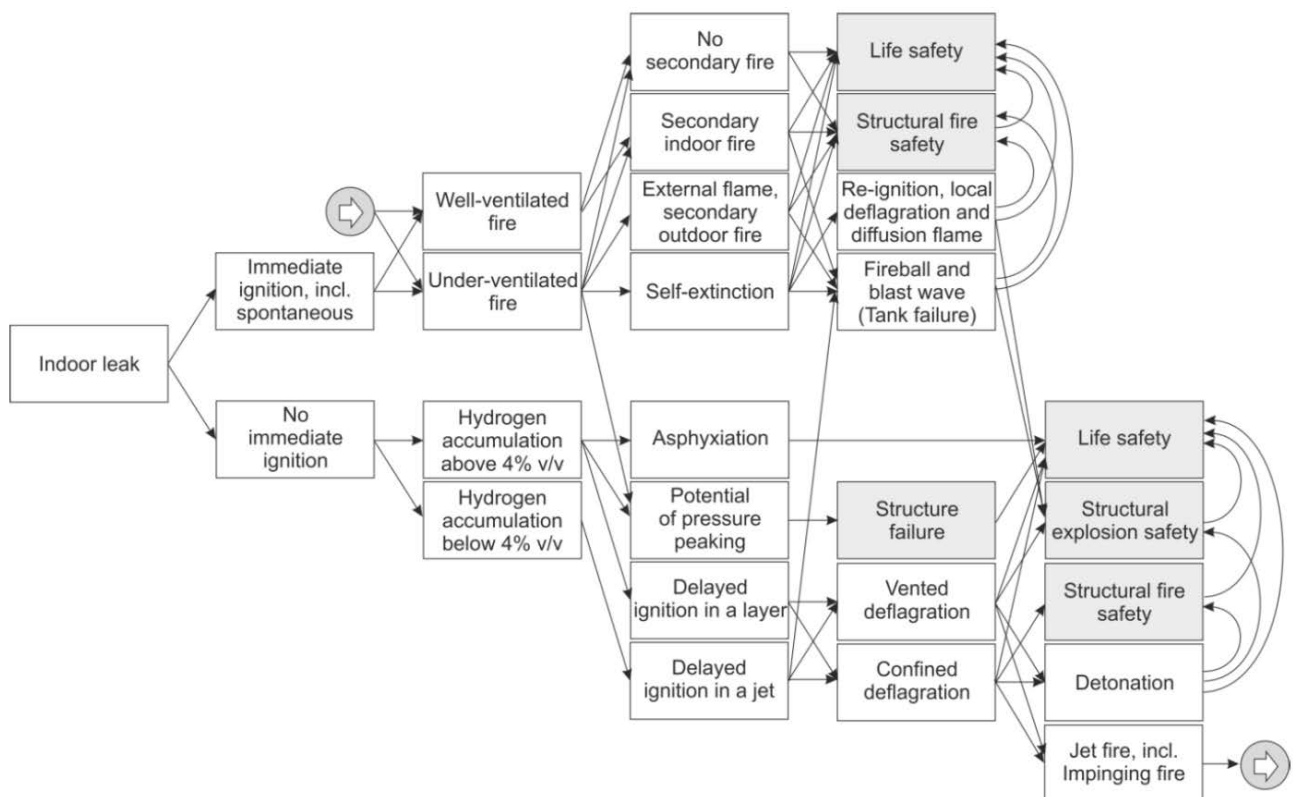
4 Hydrogenlekkasje i innelukkede rom

4.1 Hydrogengassens egenskaper

Til bruk i kjøretøyer lagres hydrogen som gass komprimert ved høyt trykk på en komposittank. Hydrogengassmolekylet er det letteste molekylet som finnes, og er svært flyktig. Utendørs vil hydrogen stige oppover, og raskt fortynnes. En lekkasje utendørs vil i liten grad utgjøre en fare for en kraftig eksplosjon. Skjer derimot en hydrogenlekkasje innenfor et område der gassen har mulighet til å samles opp, og det er begrensede ventilasjonsforhold, kan dette utgjøre en risiko. Hydrogen har et bredt eksplosjonsområde (4 – 75) %, er usynlig og luktfri. Mer utfyllende informasjon om egenskapene til hydrogen finnes i RISE sine tidligere rapporter [2]–[4].

4.2 Potensielt hendelsesforløp ved innendørs hydrogenlekkasje

Et utslipp av hydrogen i et innelukket rom kan føre til ulike scenarier, som vist i hendesestreet gitt i Figur 4-1 [35]. Her kommer det tydelig fram at det er mange parametere som bidrar til å avgjøre konsekvensene, forutsatt at gassen antennes: blant annet størrelsen på utslippet, når gassen antennes, graden av innelukking, graden av obstruksjoner m.m. De mest alvorlige konsekvensene fra et innendørs hydrogenutslipp er en kraftig eksplosjon og en etterfølgende brann som sprer seg.



Figur 4-1 Hendesestreet som viser ulike mulige forløp ved en innendørs lekkasje av hydrogen. De grå boksene er potensielle konsekvenser som kan oppstå ved en lekkasje innendørs. Figuren er hentet med tillatelse fra Fuster et al. [35].

4.3 Akkumulering av hydrogen

I vedlegg A er det gjort noen enkle beregninger av hvordan konsentrasjonen øker i et lukket rom ved gitte lekkasje- og ventilasjonsforhold. Til tross for at modellen er en forenkling, indikerer den at små utslipp (~2,5 g/s) ikke vil resultere i konsentrasjoner som vil gi kraftige overtrykk. En CFD-simulering konkluderer med det samme [17]. Ved små lekkasjer er det likevel en viss fare for at hydrogen kan samles opp i små lommer, f.eks under panseret på bilen [36], og føre til en mindre eksplosjon ved antennelse.

5 Konsekvenser ved eksplosjon

5.1 Konsekvenser når materiell utsettes for eksplosjonstrykk

Det er tre ulike måter å bestemme strukturell respons fra overtrykk [37]:

- Empiriske metoder er mye benyttet i risikovurderinger, og er i hovedsak basert på maksimale overtrykk og trykk-impuls-diagram.
- Analytiske metoder.
- Numeriske metoder og bruk av CFD-modeller.

Den empiriske metoden baserer seg på kjente overtrykk knyttet til observerte skader. I utgangspunktet er forholdet mellom trykk og skader utledet fra TNT-eksplosjoner, og kan ofte ikke brukes direkte ved gasskyeksplosjoner. Trykket fra en TNT-eksplosjon er lokalt høyere enn hva som tilfellet for en gasskyeksplosjon. De aller fleste tilgjengelige trykk-skade-tabeller er utledet fra skader etter andre verdenskrig eller militære tester, og kan avvike noe for gasseksplosjoner. Skadenivå for ulike overtrykk er eksemplifisert i Tabell 5-1.

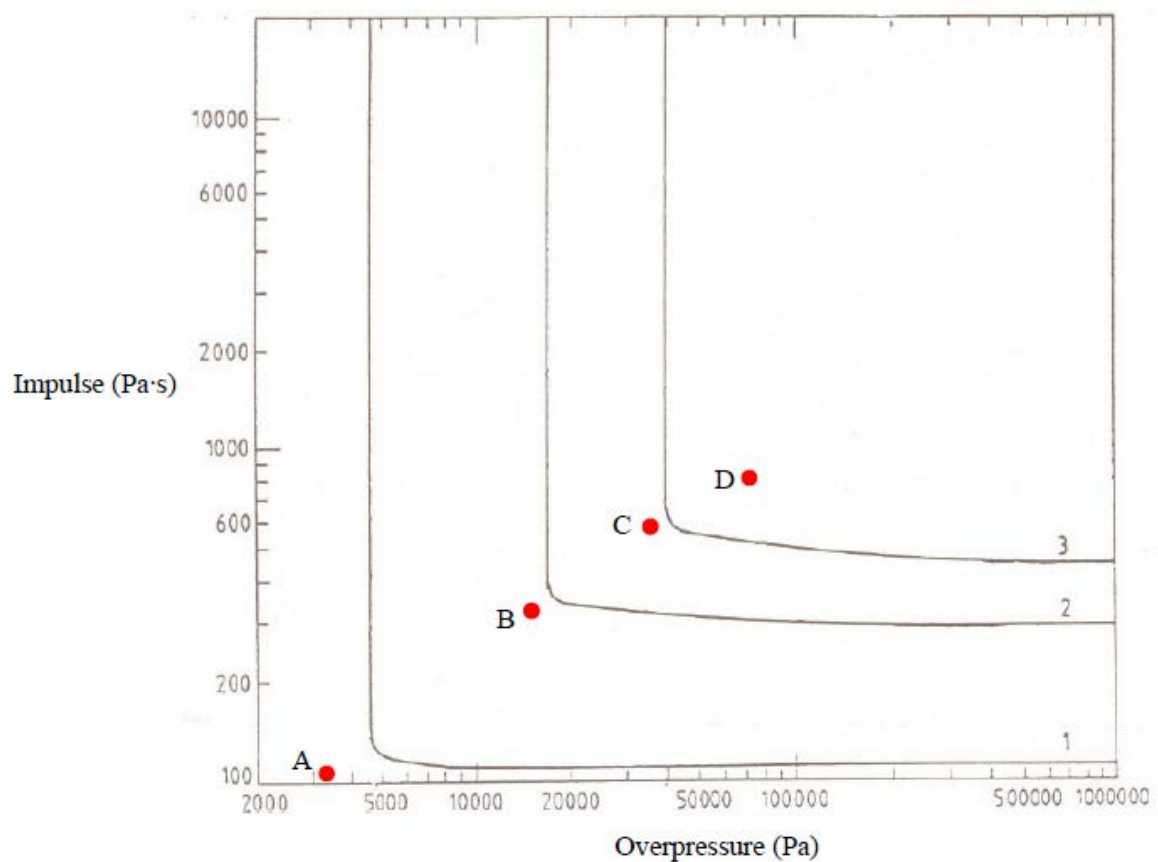
Tabell 5-1 Materielt skadenivå for ulike overtrykk [kPa] [38]:

Skadenivå	Overtrykk [kPa]
Grense for knuste vindusruter	1
Kollaps av uarmert betong	15 - 20
Kollaps av industrielle stålrammestrukturer	20 - 30
Forskyving av og brudd på rør	35 - 40
Kollaps av murvegg	17 - 50
Kjøretøy kastet rundt	55 - 83
Total ødeleggelse av bygning	70

Strukturer påvirkes ikke bare av størrelsen på overtrykket, men også varigheten. Det er derfor en bedre tilnærming å ta utgangspunkt i impulsen, eller varigheten, til trykkbølgen. Impulsen er integralet av trykket over tid, og et mål på eksplosjonsenergien. Et trykk-impuls diagram er gitt i Tabell 5-2 og Figur 5-1. Tabellen og figuren gir ikke absolutte grenser for skader, men viser at både varigheten på eksplosjonen og det maksimale trykket bidrar til et skadenivå.

Tabell 5-2 Materielt skadenivå ved ulike trykk og impulser. Tabellen er hentet fra [39]

Overtrykk [kPa]	Impuls [kPa s]	Skader	Representert i Figur 5-1.
3,6	0,10	Grense for små strukturelle skader	A
14,6	0,30	Grense for moderat strukturell skade	B
34,5	0,52	Grense for delvis destruksjon	C
70,1	0,77	Total ødeleggelse av bygning	D

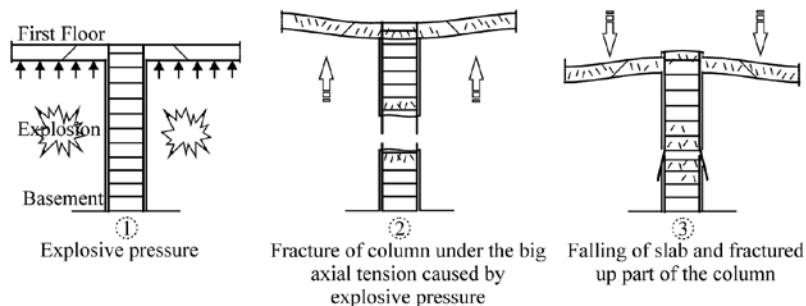


Figur 5-1 Trykk-impuls diagram. Bokstavene angir ulike skadeområder. A er område for små strukturelle skader, B moderate strukturelle skader, C delvise destruksjoner og D total destruksjon av bygninger. Figuren er hentet med tillatelse fra [39].

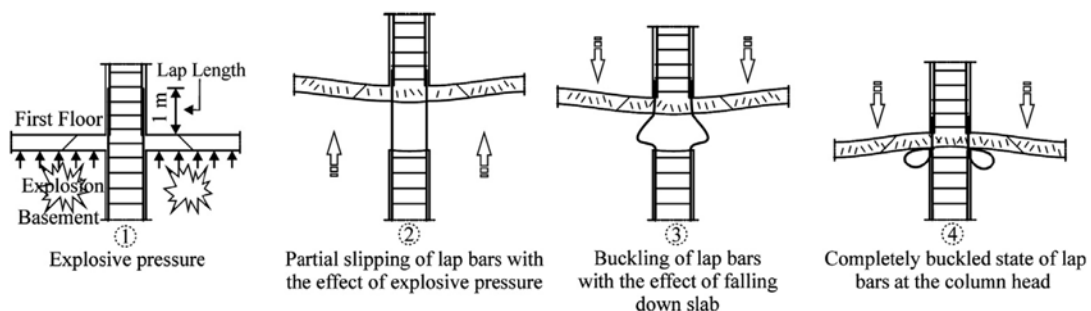
Eksempel - Propangasseksplasjon i Tyrkia

Et konkret eksempel som viser hvilke skader som kan oppstå ved en gasseksplasjon, er beskrevet i rapporten Turgut et al. 2013 «LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey» [40]. Eksempelet er fra Tyrkia i 2011 og beskriver en propangasseksplasjon. En kjeller ble fylt med propan fra en lekk slange. Kjelleren var bygget i armert betong og hadde et areal på 30 m x 40 m. Skadeomfanget varierte fra total ødeleggelse nær eksplosjonsstedet, til mindre skader lengst vekk fra eksplosjonen. Bygningen kollapset imidlertid ikke. Beregninger basert på hvilke krefter som minimum må til for å forårsake de skadene som ble observert, viser at overtrykket var i størrelsesorden 40-60 kPa. Enkelte steder løftet taket seg 100 cm og falt deretter ned på søylene igjen. Eksempler på skadene som oppsto er vist i Figur 5-2 til Figur 5-5.

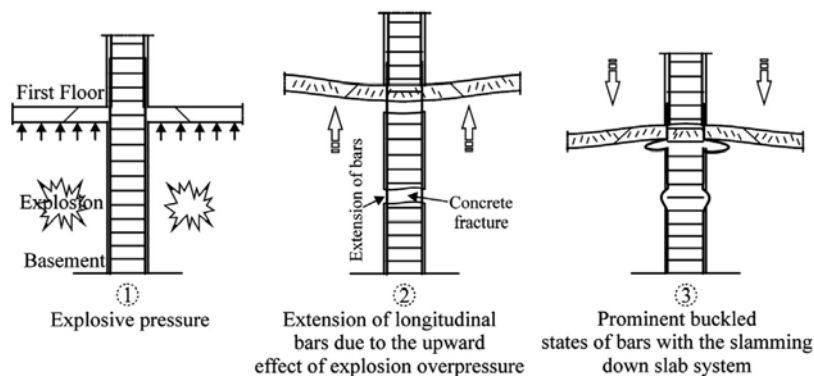
Eksemplet med propangass er brukt, fordi vi ikke har funnet et like relevant eksempel som involverer hydrogen.



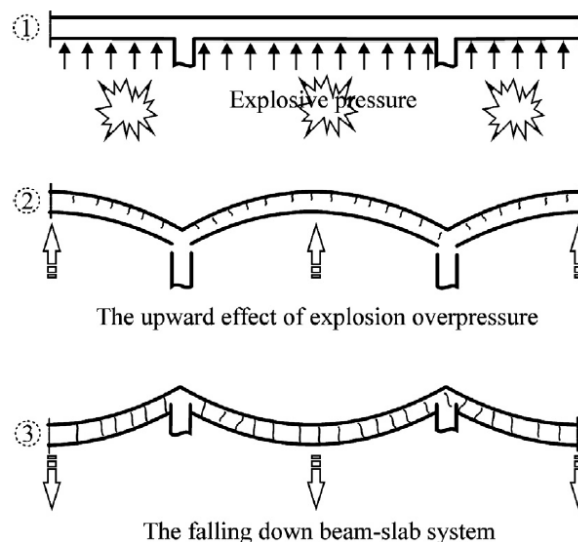
Figur 5-2 Eksplosjonstrykket løftet taket slik at armering ble brutt av. Taket ramlet deretter ned igjen og førte til skadede søyler. Figuren er hentet med tillatelse fra Turgut et al. [40].



Figur 5-3 Taket løftet seg slik at festet til armeringsjernene i taket slapp. Armeringsjernene ble skadet da taket falt ned igjen. Figuren er hentet med tillatelse fra Turgut et al. [40].



Figur 5-4 Taket løftet seg og en del av betongen på søylene sprakk opp. Armeringsjern ble noe deformert da taket falt ned igjen. Figuren er hentet med tillatelse fra Turgut et al. [40].



Figur 5-5 Taket ble løftet av eksplosjonstrykket og ble etter eksplosjonen hengende mellom søylene uten å falle ned. Figuren er hentet med tillatelse fra Turgut et al. [40].

Innelukkede rom med bæresøyler er spesielt utsatt for at taket kan kollapse. Når en gassky eksploderer, vil trykkbølgene reflekteres fra vegger, gulv og tak, slik at sekundære trykkbølger oppstår. Noe som kan skje, er at den primære trykkbølgen løfter taket, slik som i det viste eksempelet fra Tyrkia. Dersom søylene ikke er tilstrekkelig festet til gulv og tak, kan søylene slås over ende av den sekundære trykkbølgen. I slike tilfeller er det fare for at taket kan kollapse [4].

5.2 Konsekvenser når mennesker utsettes for eksplosjonstrykk

Konsekvenser når mennesker utsettes for eksplosjonstrykk [23], [38]:

- **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 lunger, ører, mage og svelg.
- **Sekundær** skade skyldes skader fra splinter som blir dannet i eksplosjonen. Splinter kan forårsake både ytre og indre skader.
- **Tertiær** skade er skader som skyldes at hele kroppen blir flyttet på eller slått over ende, og som oppstår i sammenstøt med fysiske hindringer.

Ved en eksplosjon er det hovedsakelig sekundære og tertiære skader som gjør at personer skader seg alvorlig eller omkommer. En oversikt over direkte og indirekte personskader ved ulike trykk er gitt i Tabell 5-3.

Tabell 5-3 Beskrivelse av personskader ved ulike trykk. Innholdet er hentet fra [38]

	Overtrykk [kPa]	Beskrivelse av skade
Direkte effekt på mennesker	14	Grense for skade på trommehinne
	35 - 48	50 % sannsynlighet for skade på trommehinne
	48	Grense for indre skader
	69 - 103	90 % sannsynlighet for skade på trommehinne
	83 - 103	Grense for lungeblødning
	138 - 172	50 % dødelighet pga. lungeblødning
	206 - 241	90 % dødelighet pga. lungeblødning
	482 - 1379	Øyeblikkelig død
Indirekte effekt på mennesker	7 - 14	Grense for hudskader av splinter
	10 - 20	Mennesker blir slått i bakken av trykkbølgen
	14	Mulig død dersom man blir kastet mot hindringer
	28 - 35	50 % dødelighet av splintskader
	48 - 69	100 % dødelighet av splintskader
	55 - 110	Mennesker vil bli kastet flere meter bortover

En grense på 10 kPa er foreslått som maksimalt overtrykk for personer som befinner seg innendørs, for å unngå alvorlige skader og dødsfall. En tolerabel grense er imidlertid satt til 1 kPa. Utendørs er den maksimale grensen foreslått til 21 kPa, og tolerabel grense til 8 kPa. For redningspersonell er tolerabel grense foreslått til 21 kPa utendørs [39]. Grunnen til at det er en såpass stor forskjell utendørs og innendørs, er blant annet at faren for å bli skadet av glasssplinter er vesentlig større innendørs. Ved gasseksplosjoner er det få tilfeller der personer har omkommet direkte på grunn av trykkbølgen. I tilfeller der personer har omkommet eller blitt skadet, har dette i hovedsak skyldtes brannskader, splintskader, skade ved at bygg har rast sammen, eller at personer har blitt kastet mot fysiske objekter [23].

5.3 Konsekvenser ved varmeeeksponering av mennesker

Det norske veritas (DNV) [41] har utgitt en rapport som beskriver hva mennesker tåler av ulike påkjenninger som trykk og temperatur⁴. Ved temperaturer under 70 °C vil personer føle ubehag, men evakuering vil stort sett gå greit. Ved 70 - 150 °C vil personer ha problemer med å puste. For temperaturer over 150 °C vil påvirkningen på personer være dominert av smerter av brannskader på hud som vil inntre innen 5 minutter. Ved 309 °C vil tredjegradsforbrenninger oppstå i løpet av 20 sekunder.

I en rapport fra EU-prosjektet HyResponse [42], som har som mål å utvikle opplæringsprogram for redningspersonell, er det gitt flere tabeller og diagrammer som angir sikkerhetsavstander for personer, både ved varmeeeksponering fra en jetbrann og trykkeffekter ved en forsinket antennelse. Enkelte av disse tabellene er gjengitt i avsnittet nedenfor og i Vedlegg C.

Tabell 5-4 viser for eksempel at ved utslipp fra hydrogentanker påvirkes flammelengden (hvis umiddelbar antennelse) og trykket (hvis forsinket antennelse) av diameteren på TPRD. Tabell 5-5 på sin side viser at et hydrogenutslipp, der gasstrømmen peker nedover, gir en kortere flammelengde enn om utslippet rettes oppover. Tabell 5-6 viser at en tank med et større tankvolum resulterer i høyere overtrykk enn det et mindre tankvolum gjør.

Tabell 5-4 Sikkerhetsavstander for ulike termiske påkjenninger og overtrykk ved antennelse av utslipp fra en hydrogentank. Informasjonen i tabellen er hentet fra [42].

TPRD-diameter [mm]	Tank-trykk [bar]	Umiddelbar antennelse					Forsinket antennelse			
		Flamme-lengde [m]	Flamme-radius [m]	Sikkerhetsavstand [m] ved ulike termiske effekter [kW/m ²]			Sikkerhetsavstand [m] ved ulike overtrykk [kPa]			
				3 kW/m ²	5 kW/m ²	8 kW/m ²	2 kPa	5 kPa	14 kPa	20 kPa
1,0	700	1,9	0,3	3,5 m	3,3 m	3 m	12 m	6,0 m	2,6 m	1,9 m
2,3	700	4,7	0,8	10 m	9 m	8 m	29 m	14,5 m	6,1 m	4,5 m
4,0	700	8,3	1,4	19 m	17 m	15 m	50 m	25 m	10,7 m	7,8 m

⁴ Forfatterne har ikke tatt hensyn til luftfuktigheten.

Tabell 5-5 Sikkerhetsavstander for ulike termiske påkjenninger fra jetbrann med hydrogen. Informasjonen i tabellen er hentet fra [42].

TPRD-diameter	Tanktrykk [bar]	Flammelengde	Sikkerhetsavstand [m] for ulike skadenivåer		
			Ingen skade	Smertegrense	3.grads forbrenning
4,2 mm (TPRD peker vertikalt oppover)	700	8,3 m	29 m	25 m	16,6 m
4,2 mm (TPRD peker vertikalt nedover)	700	< 4 m	14 m	12 m	8 m

Tabell 5-6 Overtrykk ved ulike avstander ved revning av hydrogentank ved ulike tankvolum. Informasjonen i tabellen er hentet fra [42].

Tankvolum [L]	Tanktrykk	Trykk ved revning	Avstand [m] for ulike overtrykk [kPa]			
			2 kPa	5 kPa	14 kPa	20 kPa
80	700 bar	770 bar	56 m	28 m	12 m	9 m
150	700 bar	770 bar	84 m	42 m	16 m	13,5 m

6 Sammenfatning av relevante studier på hydrogensikkerhet

Det er gjort mye arbeid på hydrogensikkerhet de siste årene, og dette avsnittet gir en oversikt over utvalgt og relevant litteratur. Flere studier har vært relatert til hvilke eksplosjonstrykk som kan oppstå ved ulike utslipp av hydrogen. Artikkene og prosjektene det refereres til her, er ulike på mange måter. De er basert på simuleringer eller praktiske forsøk, og har fokus på helt eller delvis innelukkede rom med ulik grad av ventilasjon, ulike ventilasjonssystemer og ulik mengde hydrogen og antennelsestidspunkt.

6.1 Eksempler på gjennomførte EU-prosjekter knyttet til hydrogensikkerhet

I løpet av det siste tiåret har det vært flere store prosjekter som har jobbet med ulike utfordringer og sikkerhetsspørsmål knyttet til bruk og oppbevaring av hydrogen som energibærer. Et utvalg er listet opp her:

- **HySafe** har samlet nyttig informasjon om sikkerhet og utfordringer knyttet til bruk av hydrogen.
- **HyIndoor** har jobbet for å tette kunnskapshull knyttet til bruk og lagring av hydrogen innendørs.
- **HyApproval** utviklet en håndbok for hydrogenfyllestasjoner.
- **HyFactor** har forsket på hva hydrogentanker tåler av mekaniske påkjenninger.
- **FireComp** har forsket på hva hydrogentanker tåler av brannpåkjenning.
- **HyResponse** har jobbet for å øke kunnskapen til redningspersonell, og har blant annet jobbet med å utvikle retningslinjer for redningspersonell.
- **InsHyde** er en del av HySafe med fokus rettet på hydrogenutslipp i innelukkede rom.

6.2 Eksempler på studier innenfor relevante temaer

Hydrogengasseksplosjoner

- Pitts et al. (2012) [36] gjorde eksplosjonsforsøk med hydrogen i en mindre garasje (113 m³). Lekkasje-raten var 1,4 g/s (totalt 5 kg), og tilsvarte en mengde som ikke så lett ville bli oppdaget av kjøretøyets overvåkningssystem. Ingen nevneverdige overtrykk ble registrert når gasskyer med konsentrasjon under 8 % ble påtatt. Ved høyere konsentrasjon ble det imidlertid registrert høyere overtrykk. Maksimalt overtrykk, ca. 50 kPa, ble oppnådd ved 29,3 % hydrogenkonsentrasjon. Det var en tydelig trend at økende konsentrasjon ga økt trykk. Det ble også registrert at trykket var vesentlig høyere i de forsøkene der det var kjøretøy tilstede, i forhold til de forsøkene som ble utført i en tom garasje. Høye trykk ble også registrert i tilfeller der hydrogen lekket inn i bilens kupé og ble antent.
- Merilo et al. (2011) [43] utførte forsøk med lekkasjerate på 2,5 g/s i en mindre garasje (60 m³). Det ble erfart at vesentlig høyere overtrykk ble oppnådd når det var en bil tilstede i garasjen, enn i en tom garasje. Maksimalt trykk med en bil tilstede var

30 kPa, mens maksimalt trykk uten bil tilstede var 7 kPa. Testene viste også at økende ventilasjonsareal bidro til å redusere hydrogenkonsentrasjonen i alle testene.

- Choi et al. (2013) [17] utførte en CFD-simulering av en lekkasje fra en hydrogentank i en 691 m³ (300 m²) parkeringskjeller. Utslippsratene varierte fra 0,18 g/s – 1,8 g/s, og ventilasjonsforholdene varierte fra 20 - 60 m³/min. Simuleringen indikerte at et utslipp på 1,8 g/s kan resultere i en brennbar gassblanding i store deler av volumet i løpet av 8 minutter ved åpen port, dersom ingen mekanisk ventilasjon er slått på. Med en ventilasjon på 20 m³/min eller større, var det kun like i nærheten av utslippet at det var en hydrogenkonsentrasjon over 4 %. I simuleringene beveget gasskyen seg med en tilnærmet konstant hastighet på 0,2 m/s.
- Venetsanos et al. (2008) [14] simulerte en rekke ulike utslipp i urbant miljø og i tunnel. I det mest relevante forsøket for dette prosjektet, ble 5 kg hydrogen sluppet ut fra en 6 mm TPRD fra en 700 bar tank inne i en tunnel. Tanken var tømt i løpet av ca. 30 sekunder. Etter 20 sekunder hadde gasskyen et volum på 519 m³ og en utstrekning på 51 m. Av dette var en masse på 3,7 kg gass innenfor brennbare konsentrasjoner. 2,9 kg var imidlertid mellom 4 – 10 %. Maksimalt overtrykk oppnådd i tunnelen var 2,3 kPa. I et annet scenario ble gassen antent umiddelbart etter utslipp. Det resulterte i en kraftig flammeball som spredte seg 47 m langs tunnelen.
- Kumar et al. (2009) [44] utførte en rekke forsøk med ulike hydrogenkonsentrasjoner (6 – 11 %) og ulike ventilasjonsbetingelser i et 120 m³ rom. Forsøkene viste at overtrykket økte med økende hydrogenkonsentrasjon, og ble redusert med økende ventilasjonsåpninger. Overtrykkene som ble oppnådd varierte fra 14 – 55 kPa.
- Middha og Hansen (2009) [45] utførte en simulering av ulike utslipp av hydrogen i tunnel. Overtrykk ble funnet til å være omtrent 10 – 30 kPa.
- Shirvill et al. (2012) [46] utførte to forsøksserier i testtrigger som skulle tilsvare en hydrogenfyllstasjon med en bil og dispensere. I det første forsøket ble ferdigblandede gasskyer på ca. 70 m³ med en gassmengde på ca. 2 kg antent. Trykkene de målte varierte fra ca. 15 kPa – 200 kPa, avhengig av hvor tennkilden var. I den andre forsøksserien ble utslipp fra en 400 bar beholder med 8 mm dyse antent. Totalt utslipp varierte fra 0,6 – 3,6 kg. Overtrykkene ble målt til 77, 105 og 181 kPa. På 30 m avstand ble overtrykkene målt til 3 – 6 kPa ved ulike antennelsessteder.
- Sommersel et al. (2017) [47] utførte eksplosjonsforsøk med hydrogen i en 6 m lang container (34, 5 m³), der en kortsides ble holdt åpen. Utslippshastigheten var ca. 0,1 kg/s og antenne skjedde etter ca. 15 sekunder. Uten obstruksjoner ble overtrykket målt til 0,4 – 7 kPa, mens med obstruksjoner i form av vertikale paller ble det målt opp mot 100 kPa.
- Tamura et al. (2014) [48] gjorde forsøk som skulle simulere en lekkasje av hydrogen etter en kollisjon. Utslippsraten var 2,8 g/s. Ved å bruke en vifte som ga en vindhastighet på 10 m/s ble gasskonsentrasjonen fortynnet til en ikke-eksplosiv blanding rundt nesten hele bilen. Områdene som fortsatt hadde en brennbar konsentrasjon var så begrenset, at det kun ga små overtrykk (~1 kPa). Dersom viften

ble rettet direkte mot stedet der lekkasjen oppstod, ble hele gasskyen fortennet til en ikke-eksplosiv blanding. Uten vifte ble det målt eksplosjonstrykk på ca. 7 kPa. Forfatterne konkluderte med at redningspersonell kunne redusere risikoen for antennelse av gasskyen dersom de ved skadestedet hadde med en kraftig vifte.

- Bie og Hao (2017) [49] utførte en simulering av hydrogenutslipp med påfølgende eksplosjon i en tunnel under ulike ventilasjonsforhold. Utslippet skjedde fra en 700 bar tank med 5 kg hydrogen og en TPRD-diameter på 6 mm. Antennelse skjedde 3 og 6 sekunder etter utslipp. Mengden gass med en konsentrasjon høyere enn 10 % ble tydelig redusert med økende grad av ventilasjon. Overtrykket ble målt til ca. 13 kPa uten ventilasjon, ved både 5 og 10 m avstand fra lekkasjen på begge sider av bilen. Med ventilasjon på 6 m/s ble overtrykket målt til ca. 13 kPa i en avstand på 5 og 10 m nedstrøms av lekkasjen, og 8 – 9 kPa i en avstand på 5 og 10 m oppstrøms av lekkasjen.
- Tanaka et al. (2007) [50] utførte forsøk i et rom (120 m³) som skulle simulere et lagringsrom for en hydrogenfylllestasjon på et 800 m² område. Ved 8 % konsentrasjon i rommet ble ingen vesentlige skader registrert. Ved 15 % ble det målt 0,4 – 1,3 kPa inne i rommet, og ca. 3 kPa utenfor. Ved 26 % hydrogen ble det målt overtrykk inne i rommet over 100 kPa, og 28 – 111 kPa utenfor. Konklusjonen var at det var viktig å unngå at hydrogenkonsentrasjonen fikk øke til mer enn 15 %, og dette kunne forhindres ved hjelp av deteksjon og ventilasjon.

Hydrogentankeeksplosjoner

- Zalosh og Weyandt (2005) [19] utførte branntester av hydrogentanker der TPRD-en var blokkert. Tanken hadde et trykk på 345 bar og et volum på 72,4 liter, og en hydrogenmengde på 1,64 kg. Tanken ble utsatt for en 370 kW flamme og revnet etter 6 min og 27 s. Forsøket ble utført utendørs. Flammeballen som ble dannet hadde en diameter på 7,7 m. Det ble målt trykk på 300 kPa på 1,9 m avstand og 41 kPa på 6,5 m avstand. Deler av tanken ble kastet 82 m gjennom luften som følge av eksplosjonen.
- Li et al. (2015) [51] undersøkte sikkerhetsavstander for et utendørs hydrogenutslipp ved hjelp av CFD-modellering. Diameteren til TPRD-en var 4,2 mm, og tankvolumet var 171 liter med 700 bar trykk. Med denne geometrien ble tanken tømt i løpet av 75 sekunder. Sikkerhetsavstandene ble definert ved 4 % hydrogenkonsentrasjon og 70 °C for privatpersoner og luftinntak, og ved 8 % og 115 °C for redningspersonell uten beskyttelsesutstyr, og 8 % og 260 °C for redningspersonell med beskyttelsesutstyr. Ved gasslekkasje uten antennelse ble sikkerhetsavstanden beregnet til 12 m for vanlige personer, 10,5 m for redningspersonell uten beskyttelsesutstyr, og 9,2 m for redningspersonell med beskyttelsesutstyr. Dersom gassjeten ikke antennes når den over en lengre distanse, og basert på beregningene anbefales det å ikke ha hydrogenkjøretøyer nærmere enn 13 m til et luftinntak til bygg.
- Tamura et al. (2014) [14] undersøkte om brann i et hydrogenkjøretøy kunne spre seg når en TPRD ble utløst. En ekstern brann ble brukt til å utløse TPRD. En kraftig flammeball omsluttet bilen idet gassen ble sluppet ut og antente. Dette var imidlertid ikke nok til å antenne nabobilen som stod 0,85 m unna. En ulempe med denne testen,

er at hydrogentanken som ble benyttet var noe mindre (36 liter og 700 bar) enn de som brukes i moderne hydrogenkjøretøy. Toyota Mira har eksempelvis to tanker på til sammen 122 liter (60 + 62) og 700 bar [52].

- Molkov (2015) [53] har utarbeidet en modell for å beregne trykk og temperatur når en hydrogentank revner i en brann. Diagrammene i Vedlegg C er basert på disse modellene.
- Tamura og Sato (2016) [54] har undersøkt om det er mulig at en TPRD utløser som følge av ekstern varmestråling før omgivende materialer rundt hydrogentanken begynner å brenne. Konklusjonen er at omgivende materialer vil begynne å brenne før TPRD-en løser ut.
- EU-prosjektet FireComp [55] undersøkte ulike løsninger for å unngå at en hydrogentank revner når den blir utsatt for en brann, og rapporten gir en bred innføring i ulykker som har oppstått der TPRD-er ikke har løst ut.

Beregning av brann- og eksplosjonsparametere

Det finnes en rekke diagram og tabeller som kan brukes for enkelt å bestemme egenskaper ved et utslipp, eksempelvis:

- Molkov [56] har laget et nomogram (se Vedlegg B) der man, på grunnlag av diameteren til en TPRD og trykket i tanken, kan angi blant annet flammelengde og sikkerhetsavstand til en hydrogengasstrøm som ikke er antent. I denne tabellen er sikkerhetsavstanden angitt til den avstanden der hydrogenkonsentrasjonen i jetstrømmen er 4 %. Dette er en avstand fra dyse n som er ca. 3 ganger lengre en lengden på flammen, og er beregnet som en sikker avstand. Flammelengden er basert på 70 eksperimenter. Resultatene viser at en jetbrann fra et høytrykks hydrogenutslipp har en gjennomsnittlig utbredelse til der hvor hydrogenkonsentrasjonen er 8 % – 16 %, med et gjennomsnitt på 11 %. Sikkerhetsavstanden som man finner ved å benytte nomogrammet vil være mest aktuelt ved en utendørs lekkasje, siden det kun tas hensyn til varmeeeksponering fra en eventuell jetbrann, og ikke at den kan oppstå en eksplosjon.
- HyResponse [57] har laget en *Emergency Response Guide*. I denne er det mye nyttig informasjon om hva som må gjøres ved ulykker der en hydrogentank er involvert. Det er også angitt overtrykk fra revning av en hydrogentank ved ulike avstander, både frittstående og i kjøretøy, og både utendørs og innendørs (se Vedlegg C).
- Gexcon i Norge [58] har med partnere utviklet beregningsverktøy som kombinerer CFD-, risiko- og strukturberegninger.

Ventilasjon

Flere prosjekter har studert hvordan ventilasjon kan hindre at en lekkasje akkumuleres til en brennbar gassblanding:

- I prosjektet HySafe [21] anbefales det at ventilasjonen skal ha 20 – 25 luftutskiftninger per time (LUT) for å redusere mengden hydrogen som kan akkumuleres.

- FM Global [22] anbefaler minimum 10 LUT, med mulighet til å øke til 25 LUT ved deteksjon av hydrogen.
- Fuster et al. (2017) [35] kommer med følgende anbefalinger:
 - Vurder om det er strengt nødvendig å oppbevare hydrogen eller hydrogensystemer innendørs, eller om det like godt kan oppbevares utendørs hvor en eventuell lekkasje vil fortynnes vesentlig raskere.
 - Identifiser og fjern tennkilder (hvis mulig).
 - Ved passiv ventilasjon bør ventilasjonsåpningene plasseres på vegger istedenfor i tak.
 - Benytt heller flere ventilasjonsåpninger ved ulike høyder enn en stor ventilasjonsåpning med tilsvarende areal som de små.
 - Et innelukket rom skal ha tilstrekkelig antall ventilasjonsåpninger. Hvis mulig, bør et ventilasjonsanlegg designes slik at konsentrasjoner ikke overstiger nedre eksplosjonsgrense for forventede hydrogenutslipp.
 - Det er fordelaktig med ventilasjonsåpninger både lavt og høyt på veggen.
 - Fjern unødvendige obstruksjoner, blant annet foran ventilasjonsåpninger.
 - Tilstrekkelige avlastningsflater er den mest benyttede måten å redusere konsekvensene av en eksplosjon.
 - Mekanisk ventilasjon er nødvendig der passiv ventilasjon ikke er tilstrekkelig.
 - Ved små volum må *pressure peaking phenomenon* vurderes (se avsnitt 2.2).
 - Viktig at CFD-modeller benyttes kun for forhold de er validert for.
- Anbefalinger fra prosjektet HyIndoor [59]:
 - Mengden hydrogen som lagres innendørs må ikke overstige $0,26 \text{ g/m}^3$, for å hindre at overtrykk kommer over 10 kPa. Dersom dette ikke er mulig, må andre supplerende tiltak settes inn.
 - Gassutstrømning fra en TPRD bør begrenses til maksimalt 60 g/s. Da tømmes tanken på rundt 90 sekunder. Dette vil redusere størrelsen på en eventuell jetbrann, og redusere sannsynligheten for at konsentrasjonen når en eksplosiv gassblanding.
 - Horisontale ventilasjonssjakter bør unngås.
 - Takventilasjon er ikke like effektiv som veggventilasjon
 - Dersom det kun er én ventilasjonsåpning, bør denne plasseres opp mot taket.
 - Det er bedre å velge en høy og smal ventilasjonsåpning enn en bred og lav ventilasjonsåpning.
 - Dersom naturlig ventilasjon ikke er tilstrekkelig, må mekanisk ventilasjon installeres.

Selv om en del av anbefalingene er relevante også for parkeringskjellere, er det tydelig at de primært er rettet mot boliger og annen innendørs bruk. Hvis eksempelvis anbefalingen om maksimal konsentrasjon på $0,26 \text{ g/m}^3$ skal gjelde for hydrogenkjøretøy, krever dette at parkeringskjelleren må ha en grunnflate på mer enn 8000 m^2 for at et hydrogenkjøretøy kan parkeres der. Det finnes få parkeringsanlegg på denne størrelsen.

Anbefalinger og kunnskapshull

Rapporten «State of the art and research priorities in hydrogen safety» [16] beskriver følgende utfordringer ved innendørs utslipp:

- Overflaters påvirkning på en gassutstrømning som ikke er antent.
- Utslipp med høyt trykk.
- Hvordan utslippet påvirkes av ventilasjonsbetingelser.
- Oppførsel til flytende hydrogen innendørs.
- CFD-modeller må valideres mot flere fullskala tester.
- Mangel på fullskala tester med realistiske objekter.
- Flammehastigheter og overgang fra deflagrasjon til detonasjon i delvis innelukkede rom.
- Påvirkning av obstruksjoner på flammehastigheter.
- Sammenheng mellom hydrogenkonsentrasjon, innelukking og mulighet for detonasjon.

6.3 Sannsynlighet for en hendelse med hydrogenkjøretøy

Dette prosjektet har ikke hatt fokus på hvor sannsynlig det er at ulike uønskede hendelser oppstår, men ønsker likevel å trekke fram en studie utført av Rodionov et al. [60]. Studien definerte ulike scenarier som kan oppstå og koblet disse opp mot hvor ofte lignende hendelser har skjedd. Videre vurderte forfatterne sannsynligheten for at komponenter som et hydrogen-system består av kan feile. De konkluderte med at 99,8 % av risikoen ved et hydrogenkjøretøy er knyttet opp mot hendelser i åpne eller halvåpne områder, og har et skadepotensial tilsvarende vanlige trafikkulykker (personskader og omkomne blant personer direkte involvert). De har også beregnet seg fram til at sannsynligheten til en trafikkulykke er $3,69 \cdot 10^{-3}$ per bil per år, mens sannsynligheten for en eksplosjon fra en hydrogenbil er $5,47 \cdot 10^{-5}$ per bil per år. Sannsynligheten for en alvorlig eksplosjon er imidlertid langt lavere, $9,72 \cdot 10^{-9}$ per bil per år.

Forfatterne konkluderer med at man aldri helt kan utelukke uønskede hendelser med hydrogen, men at det samtidig er langt større sannsynlighet for å bli involvert i en trafikkulykke.

Ifølge litteraturen vil det være følgende svakheter med slike sannsynlighetsmodeller [16]:

- Det finnes ikke en god nok sannsynlighetsmodell for å bestemme antennelse av hydrogensky.
- Sannsynlighetsmodeller for detektering av flammer og gass er ikke gode nok.
- Det er mangel på enkle modeller for å estimere skader ved eksplosjoner. Å bruke en CFD-modell og numeriske beregninger er mulig, men for ressurskrevende til å analysere hvert eneste mulige scenario.
- Det er mangel på hydrogen-spesifikke data. Ofte må man bruke data fra andre applikasjoner, noe som medfører en viss usikkerhet. Et eksempel er at overtrykk-skade-tabeller ofte er basert på militære eksplosjoner.
- Menneskelige, programvare-relaterte og organisatoriske feil er ofte ikke inkludert.
- Mangel på hydrogen-spesifikke skadekriterier for mennesker ved termisk eksponering. Eksisterende skadekriterier gjenspeiler ikke det termiske spektrumet fra hydrogenflammer.

7 Diskusjon

7.1 Brann- og eksplosjonssikring av eksisterende, norske parkeringskjellere

Brannsikring av parkeringskjellere er i stor grad påvirket av i hvilken tidsperiode parkeringskjellerne er bygget. En tydelig forbedring kom i 2010 da parkeringskjellere med areal større enn 400 m² måtte ha automatisk slokkeanlegg. Tidligere hadde dette stort sett vært forbeholdt parkeringsanlegg større enn 1200 m². Basert på statistikk vet vi at automatiske slokkeanlegg i de aller fleste tilfeller hindrer brannen i å spre seg til andre kjøretøyer. En hydrogentankeeksplosjon er derfor mindre sannsynlig i en parkeringskjeller med automatisk slokkeanlegg. Les mer om dette i avsnitt 7.3.

Fram til nå har det vært få gasskjøretøy i Norge, og det har derfor i liten grad vært aktuelt å sikre parkeringskjellere mot en gasslekkasje og en eventuell eksplosjon. Som beskrevet i avsnitt 3.2 er de vanligste tiltakene for å redusere risikoen ved en gasseksplosjon følgende:

- At det er tilstrekkelige avlastningsflater.
- At det finnes gassdeteksjon, og at denne er koblet opp mot et ventilasjonsanlegg.
- At det anvendes kun utstyr godkjent for bruk i eksplosiv atmosfære.

Alle parkeringskjellere har minst én avlastningsflate, i form av portåpningen(e). Arealet av denne avlastningsflaten er imidlertid ikke dimensjonert for å avlaste et bestemt overtrykk, men er dimensjonert med hensyn til de kjøretøyene som skal inn og ut av parkeringskjelleren. I store anlegg vil portåpningen kunne befinne seg langt vekk fra en potensiell eksplosjon, og vil i så fall ikke avlaste trykket like effektivt som når eksplosjonen finner sted like ved åpningen.

På grunn av at parkeringskjellere normalt ligger under bakkenivå, og er lukket på alle sider, er naturlig ventilasjon ofte lite gjeldende. I parkeringskjellere med åpen port vil det være en viss form for naturlig ventilasjon, mens i parkeringskjellere med lukket port er naturlig ventilasjon svært begrenset.

Parkeringskjellere er imidlertid utstyrt med eksosventilasjon. Eksosventilasjonen bytter ut luften i anlegget ca. 1,25 ganger per time for langtidsparkering og 2,5 ganger per time for korttidsparkering. Dette er vesentlig lavere enn det som er anbefalt i litteraturen (se avsnitt 3.2). For små utslipp av hydrogen kan eksosventilasjon imidlertid være tilstrekkelig til å hindre at det dannes en hydrogensky med brennbar konsentrasjon.

Enkelte parkeringskjellere har installert røykventilasjon. Dette er langt kraftigere vifter som skal trekke ut røyk i tilfelle brann. Disse vil kunne ventilere vekk noe større hydrogenutslipp. Ulempen med de installerte ventilasjonsanleggene er at de i liten grad er godkjent i henhold til ATEX-direktivet, og ikke er koblet opp mot en hydrogendetektor. Å knytte røykventilasjonen opp mot en detektor og bytte ut komponenter i henhold til ATEX-direktivet er i så fall en modifikasjon som må gjøres før røykventilasjonen kan regnes som et forebyggende tiltak rettet mot hydrogengasseksplosjon.

7.2 Vurdering av skadepotensiale

Når man skal vurdere skadepotensiale, er det viktig å skille mellom de ulike scenariene som kan oppstå. I dette prosjektet har vi i hovedsak skilt mellom en hydrogengasseksplasjon og en hydrogentankeksplasjon. En hydrogengasseksplasjon er en hendelse der hydrogen har lekket ut fra en tank, blandet seg med luft til en eksplosiv blanding, og deretter blitt antent. En hydrogentankeksplasjon er et scenario der en hydrogentank har blitt utsatt for en kraftig varmpåkjenning, og på grunn av en defekt TPRD, til slutt har revnet.

Når det gjelder skadepotensiale for en hydrogengasseksplasjon, så vil dette påvirkes av en rekke faktorer som kan variere fra situasjon til situasjon, og fra bygg til bygg:

- Hastigheten på utslippet (avhenger av tankens trykk og TPRD-diameter).
- Mengden gass som slipper ut (avhenger av størrelse på tank og hvor mye som er igjen på den).
- Konsentrasjonen av gassen idet den antennes (avhenger til en viss grad av ventilasjonsbetingelser).
- Størrelsen på rommet der gassen slipper ut.
- Antall obstruksjoner og formen på disse (lysrør, vifter og andre obstruksjoner kan variere fra sted til sted, og antallet biler kan variere fra dag til dag).
- Når og hvor antennelsen skjer.
- Hvor store avlastningsflater det er (varierer fra sted til sted), og hvor langt unna disse er.
- Hvor godt bæresøyler er forankret i tak og gulv.
- Hvilke ventilasjonsforhold (naturlige eller mekaniske) som er tilstede (varierer fra sted til sted).

Til tross for alle disse parameterne er det viktig å skille mellom små utslipp, som kan oppstå fra ødelagte slanger, defekte koblinger eller utette pakninger, og store utslipp som kan oppstå ved en alvorlig feil på en TPRD.

Små utslipp i store volum vil i mange tilfeller kun resultere i mindre skader (gitt at gassen blir antent), fordi tilførselen per tid ikke er tilstrekkelig til at konsentrasjonen rekker å bygge seg opp til en konsentrasjon som er forbundet med høye overtrykk. En CFD-beregning [17] av et utslipp i en parkeringskjeller med ventilasjon, samt egne beregninger (Vedlegg A) indikerer det samme.

Større utslipp, derimot, vil føre til at store deler av hydrogenskyen har en konsentrasjon som er brennbar (> 4 %), og deler av skyen vil også ha en konsentrasjon som er forbundet med fare for høye overtrykk (> 10 %). Et slikt utslipp er det vanskelig å gardere seg mot ved hjelp av et ventilasjonsanlegg. Et ventilasjonsanlegg kan imidlertid bidra til å fortynne hydrogenkonsentrasjonen etter utslippet, men ved et slikt tilfelle vil det for et gitt tidsrom være fare for en kraftig eksplosjon om det er tenkilder tilstede.

I løpet av de siste årene er det gjennomført flere eksplosjonsforsøk med hydrogengass som kan relateres til problemstillingen ovenfor. Forsøkene har til felles at det er benyttet en hydrogenmengde (opp til 5 kg) som er representativ for hva som vil finnes i en privat

hydrogenbil. I tillegg er forsøkene utført med høy grad av innelukking, noe som også er relevant med tanke på forholdene i en parkeringskjeller.

Resultatene viser at ved høy grad av innelukking, flere obstruksjoner og konsentrasjoner nær støkiometrisk blanding, kan små gasmengder (< 5 kg) føre til overtrykk i størrelsesorden 100 kPa. Dette tilsvarer store materielle skader i nærheten av eksplosjonen, og kritiske personskader eller død for personer som befinner seg i nærheten. Den samme gasmengden kan imidlertid under andre forhold resultere i kun mindre overtrykk (< 10 kPa), som mest sannsynlig ikke vil føre til alvorlige skader, verken på bygninger eller mennesker. Testene viser også hvordan graden av innelukking og graden av obstruksjoner påvirker hvor stort overtrykket blir. Eksempelvis ble det i en testserie [47] målt et overtrykk på 0,4 – 7 kPa uten obstruksjoner, mens med obstruksjoner i form av paller ble overtrykket målt til rundt 100 kPa.

Til tross for at disse forsøkene bidrar med mye viktig informasjon, er ingen av dem utført i romstørrelser som tilsvarer en parkeringskjeller (> 400 m²). Et større romvolum vil imidlertid være gunstigere enn et mindre romvolum med tanke på en hydrogenlekkasje. Et større romvolum vil bidra til at et hydrogenutslipp kan fordele seg slik at konsentrasjonen jevnt over blir lavere. Tester viser at økende hydrogenkonsentrasjon resulterer i høyere overtrykk. 5 kg hydrogen tilsvarer ca. 60 m³ gass. Dersom denne gassen fordeles jevnt utover i en parkeringskjeller, får vi følgende konsentrasjoner:

- 100 m² areal og 2,4 m takhøyde gir en konsentrasjon på 25 %.
- 400 m² areal og 2,4 m takhøyde gir en konsentrasjon på 6,25 %.
- 1000 m² areal og 2,4 m takhøyde gir en konsentrasjon på 2,5 %.

Til tross for at det er utfordrende å angi hvilke konkrete skader som kan oppstå, vet vi nok til å kunne si at under uheldige omstendigheter kan 5 kg hydrogen som antennes føre til omfattende skader i en parkeringskjeller. En ulykke i Tyrkia [40] (som beskrevet i avsnitt 5.1) er et konkret eksempel på hvilke skader en gasseksplosjon kan føre til i et innelukket rom. Det beregnede overtrykket som oppstod er i samsvar med resultater fra tester som er utført i mindre volum.

En annen faktor som i liten grad er vurdert her, er at en eksplosjon kan føre til brann, og en brann i seg selv kan føre til omfattende skader på et bygg. Det er dermed ikke en direkte kobling mellom at små overtrykk fører til kun mindre skader.

Når det gjelder skader fra en hydrogentankeeksplosjon, er det ingen tvil om at denne kan føre til høyt trykk, og omfattende skader på objekter i nærheten. Samtidig er det verdt å merke seg at trykkbølgen i hovedsak skyldes trykket som i utgangspunktet var i beholderen, og ikke en rask, kjemisk forbrenningsreaksjon. Grunnen til dette er at gassen ikke er forblandet med luft, og reaksjonen går derfor saktere. Hydrogenet vil imidlertid brenne opp i en kraftig flammeball. Vedlegg C gir en indikasjon på hvilke trykk og temperaturer som oppstår i nærheten av en tank som eksploderer.

En ting å merke seg er at den totale energien lagret i en full hydrogentank i en personbil er mindre enn i en full bensintank. Eksempelvis tilsvarer 5 kg hydrogengass varmeenergien til 22 liter bensin.

7.3 Risiko for eksplosjon

Risiko defineres ved konsekvensene av en hendelse og sannsynligheten for at hendelsen skjer. For at en stor lekkasje fra en hydrogentank eller en tankeeksplosjon skal skje, er det flere hendelser som må inntreffe samtidig. Den samlede sannsynligheten er derfor et produkt av sannsynligheten for at hver enkelt hendelse skal finne sted. Jo flere hendelser som må inntreffe, desto mindre sannsynlig blir det at en ulykke skal skje, og jo mindre blir risikoen.

For at en hydrogentankeeksplosjon skal finne sted i en parkeringskjeller, må for eksempel følgende hendelser skje:

1. En brann må oppstå i en parkeringskjeller.
 - Branner i parkeringskjellere skjer sjelden, men inntreffer likevel et par ganger per år. Fra DSB sin statistikk var det 2 branner i parkeringskjeller i 2016 og 6 i 2017.
2. For at hydrogentanken teoretisk skal kunne eksplodere, må brannen i parkeringskjelleren enten oppstå i et hydrogenkjøretøy, eller være så kraftig at den sprer seg til et hydrogenkjøretøy.
 - Dersom parkeringskjelleren har installert automatisk slokkeanlegg, vil en brann i et kjøretøy normalt ikke spre seg til andre kjøretøy. I parkeringskjellere med automatisk slokkeanlegg må derfor brannen starte i et hydrogenkjøretøy for at det i det hele tatt skal være en viss sannsynlighet for at tanken eksploderer.
3. Dersom hydrogenkjøretøyet begynner å brenne, må TPRD-en unngå å løse ut for at en hydrogeneksplosjon skal finne sted.
 - Dette har skjedd i sjeldne tilfeller for CNG-tanker, der tanken har blitt kun lokalt oppvarmet, eller der slokkevann har kjølt ned TPRD-en. Hydrogentanker må gjennom en strengere branntest enn CNG-tanker, og sannsynligheten for at TPRD-en ikke skal løse ut er derfor svært liten.

Selv om vi ikke har beregnet sannsynligheten, er store lekkasjer fra hydrogentanken når en bil er parkert i en parkeringskjeller, eller at tanken skal eksplodere ved eksponering for en brann, avhengig av at flere mindre sannsynlige hendelser må inntreffe samtidig, og sannsynligheten for at dette skal skje er derfor liten.

Når tenningen på bilen er skrudd av, skal hydrogentanken være lukket. For at det skal kunne oppstå en lekkasje, må kjøretøyet enten være skrudd på, eller det må være en feil på lukkemekanismen. I tillegg til dette må det være utettheter i slanger, pakninger eller koblinger. Dersom en slik lekkasje overstiger mengden som brenselcellen vanligvis benytter, vil dette oppdages av kjøretøyets datamaskin, som stenger av hydrogentilførselen. Det er derfor liten sannsynlighet for at dette skjer, og hvis det skjer vil det mest sannsynlig være en liten mengde hydrogen. Store overtrykk oppstår først når konsentrasjonen overstiger 10 %.

Det mest alvorlige tilfellet som kan skje, er at TPRD-en ved en feil åpner seg, og på den måten slipper ut hele tankens innhold i løpet av et titalls sekunder. Samtidig er det også her viktig å være klar over at sannsynligheten for dette er ekstremt liten. Det er vanskelig å se for seg et scenario som gjør at TPRD-en løser ut uten noen som helst foranledning. Tanken er trygt be-

skyttet i bilen, og de hastighetene som er aktuelle i forbindelse med en kollisjon i en parkeringskjeller vil ikke kunne forårsake så store skader at dette kan påvirke tanken og TPRD-en.

7.4 Begrensninger ved å bruke tabeller for å beregne sikkerhetsavstander?

Både i avsnitt 5.3 og i vedleggene er det gitt en rekke tabeller og diagrammer som kan brukes til å estimere sikkerhetsavstander for ulike scenarier. Tabeller og diagrammer er gode verktøy til å få et raskt overblikk over omtrent hvilke avstander som regnes som sikre. Samtidig er disse tabellene i utgangspunktet gyldige kun for et begrenset utvalg av tankparametere. For eksempel angir Tabell 5-4 ikke størrelse på tanken og retning på TPRD-en. Tabell 5-5 angir ikke størrelse på tanken, og kun én TPRD-diameter. Det er derfor viktig å være klar over at slike tabeller ikke nødvendigvis er gyldige for alle scenarier. Nomogrammer, på den andre siden, er mer nøyaktige, ettersom man kan bruke dem for å finne flere verdier for de definerte parameterne, enn hva som er angitt i tabeller. Samtidig kan nomogrammer være vanskeligere å benytte for personer som ikke har fått tilstrekkelig opplæring i hvordan de skal brukes. Et eksempel på bruk av et nomogram er gitt i Vedlegg B.

7.5 Veien videre

Litteraturen lister opp en rekke områder hvor det er behov for mer kunnskap. Et viktig område er validering av CFD- og risikomodeller. Siden slike modeller i stor grad brukes som verktøy i risikoanalyser er det viktig at modellene er validert for de applikasjonene de benyttes for, slik at de gir et riktig bilde av den situasjonen de forsøker å beskrive.

Et annet viktig videre arbeid blir å finne sannsynligheter for at ulike scenarier skal skje. Dette kan gjøres ved blant annet å undersøke alle sikkerhetsbarrier som er bygd inn i et hydrogenkjøretøy, og analysere hvordan og hvor ofte disse kan feile. På den måten vil man bedre kunne avgjøre om risikoen ved hydrogenkjøretøy er på et akseptabelt nivå.

Et annet spørsmål som er viktig å besvare i kjølvannet av denne rapporten, er hvorvidt det er riktig å pålegge eiere av en parkeringskjeller å implementere de samme sikringstiltak som for eksempel kreves i industrien (aktiv ventilasjon, deteksjon, tilstrekkelige avlastningsflater og eksplosjonssikkert, elektrisk utstyr). Krav om sikringstiltak vil kunne påføre ekstra kostnader for eiere av parkeringskjellere. Av erfaring med elbiler i parkeringskjellere vet vi at blant annet borettslag vil ha vanskeligheter med å akseptere slike utgifter. I praksis kan dette føre til at hydrogenkjøretøy ikke tillates i parkeringskjellere. Dette vil kunne fungere som en brems i markedet, noe som kan være uheldig med tanke på å nå miljøpolitiske mål. Samtidig, hvis man ukritisk lar hydrogenkjøretøy bli parkert i alle typer bygg uavhengig av sikringstiltak, øker dette sannsynligheten for at ulykker kan skje. Og ulykker vil definitivt virke som en brems i markedet. Det er derfor viktig å velge en tiltakspakke som er overkommelig med tanke på pris og praktiske forhold, men som samtidig sikrer at risikoen er på et akseptabelt nivå.

Et videre arbeid vil også være å undersøke nærmere hvilke skader en eksplosjon kan påføre bæresøyler, og da med spesielt på fokus på sammenhengen mellom strukturens egenfrekvens og varigheten av eksplosjonen.

8 Konklusjon

I denne litteraturstudien har vi sett på mulige konsekvenser for bygg og mennesker ved hydrogengasseksplisjon, der hydrogen fra en lekkasje akkumuleres og antennes, og ved hydrogentankeksplisjon, der hydrogentanken revner som følge av varmpåkjenning.

Det er god kunnskap om hvordan eksisterende parkeringskjellere er bygget gjennom ulike perioder, med hensyn til størrelse, materialer, brannsikring og ventilasjon. For de eldste parkeringskjellerne er det ikke krav om verken brannalarmanlegg eller automatisk slokkeanlegg, mens dette er vanlig i nyere parkeringskjellere. Samtidig er det kun et fåtall av eksisterende parkeringskjellere som har ventilasjonsanlegg utover påkrevd eksosventilasjon. Fram til nå har det vært få gasskjøretøy på det norske markedet, og det har i liten grad vært aktuelt å sikre parkeringskjellere mot gasslekkasjer og en eventuell eksplosjon. Dette gjør at vanlige sikringstiltak for å redusere risikoen ved en eksplosjon, som avlastningsflater beregnet ut fra forventet eksplosjonstrykk, deteksjon koblet opp mot et ventilasjonsanlegg med tilstrekkelig kapasitet, og eksplosjonssikkert, elektrisk utstyr, derfor er lite utbredt i eksisterende parkeringskjellere.

Små lekkasjerater fra et hydrogensystem (slanger, koblinger) i store romvolum med eksosventilasjon er ikke forventet å resultere i store overtrykk, men lokale lommer av hydrogen kan samles opp, f.eks under panser, og gi mindre eksplosjoner hvis antent. For større utslipp av hydrogen, der hele tankens innhold slipper ut på kort tid, er det imidlertid fare for omfattende skader. Forsøkene som er beskrevet i litteraturen viser at avhengig av en rekke parametere kan 5 kg hydrogen føre til overtrykk i størrelsesorden 10 – 100 kPa. Forsøkene er imidlertid utført i innelukkede rom med et romvolum mindre enn i en parkeringskjeller, og resultatene må derfor benyttes med en viss varsomhet. En hydrogentank som revner ved eksponering av brann vil føre til en kraftig flammeball, og store eksplosjonskader lokalt.

Å beregne sannsynlighet for at ulike scenarier har ikke vært en del av dette prosjektet. Store lekkasjer fra hydrogentanken når en bil er parkert i en parkeringskjeller, eller at tanken skal eksplodere ved eksponering for en brann, krever imidlertid at flere mindre sannsynlige hendelser må inntreffe samtidig, og sannsynligheten for at dette skal skje er derfor liten.

Referanser

- [1] A. S. Bøe, "Brannsikkerhet og alternative energibærere: Gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere," SP Fire Research AS, Trondheim, Norge, SPFR-rapport 20096-04:01, Mar. 2018.
- [2] N. K. Reitan and A. Bøe, "Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom," SP Fire Research AS, Trondheim, Norway, A16 20096-1:1, Feb. 2016.
- [3] T. Berg, "Analys av vätgasssäkerhet i tunnlar och undermarksanläggningar," SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden, 2014:72, 2014.
- [4] J. Gehandler, P. Karlsson, and L. Vylund, "Risker med nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, Sweden, 2016:84, 2016.
- [5] A. S. Bøe, "Fullskala branntest av elbil," SP Fire Research, Trondheim, Norge, A17 20096:03-01, 2017.
- [6] "UNECE Regulation No. 110 - Rev. 3 - CNG and LNG vehicles." UNECE, 25-Jun-2014.
- [7] "UNECE Regulation No. 134 - Hydrogen and fuel cell vehicles." UNECE, Jun-2015.
- [8] "5 fuel tanks explode as firefighters battle trash truck blaze," *www.indystar.com*, 28-Jan-2015. [Online]. Available: <http://www.indystar.com/story/news/2015/01/27/trash-truck-explodes-near-th-westfield/22394755/>. [Accessed: 05-Dec-2016].
- [9] R. Zalosh, "CNG and Hydrogen Vehicle Fuel Tank Failure Incidents, Testing, and Preventive Measures," in *42nd annual loss prevention symposium (LPS)*, New Orleans, LA, 2008.
- [10] L. Perette and H. K. Widermann, "CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany," presented at the Society of automotive engineer world Congress, Detroit, USA, 2007.
- [11] "Hydrogen Leak from Onboard Storage System of a Fuel Cell-Powered Lift Truck," 2011. [Online]. Available: <https://www.h2tools.org/lessons/hydrogen-leak-onboard-storage-system-fuel-cell-powered-lift-truck>. [Accessed: 05-Dec-2017].
- [12] 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.
- [13] S. Brennan and V. Molkov, "Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, pp. 8159–8166, 2013.
- [14] A. G. Venetsanos, D. Baraldi, and Adams, P, "CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 21, pp. 162–184, 2008.
- [15] G. R. Astbury and S. J. Hawksworth, "Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2178–2185, 2007.
- [16] A. Kotchourko, D. Baraldi, and P. Bénard, "State of the art and research priorities in hydrogen safety," European Commission Joint Research Centre, Netherland, EUR 26344 EN, 2014.
- [17] J. Choi, N. Hur, and S. Kang, "A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, pp. 8084–8091, 2013.
- [18] P. Blanc-Vennet, S. Jallais, and B. Fuster, "FIRE TESTS CARRIED OUT IN FCH JU FIRECOMP PROJECT, RECOMMENDATIONS AND APPLICATION TO SAFETY OF

- GAS STORAGE SYSTEMS,” presented at the The 7th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2017), Hamburg, Germany, 2017.
- [19] R. Zalosh and N. Weyandt, “Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test,” presented at the SAE 2005, 2005.
- [20] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 26. mars 2010 nr. 489 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10), § 11-6 med veiledning. Tiltak mot brannspredning mellom byggverk.* 2015.
- [21] “HYSAFE - 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.
- [22] “FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 7-91.” FM Global, 2012.
- [23] D. Bjerketvedt, J. R. Bakke, and K. van Wingerden, “Gas Explosion Handbook,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 52, pp. 1–150, 1997.
- [24] “BS-EN 14797:2006 Explosion venting devices.” BSI - British standards Institution, 28-Feb-2007.
- [25] “BS-EN 14994:2007 Gas explosion venting protective systems.” BSI - British standards Institution, 29-Jun-2007.
- [26] “NFPA 68- Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting.” National Fire Protection Association, 2018.
- [27] *Byggeforskrifter av 15. desember 1949, bind I.* 1949.
- [28] *Byggeforskrifter av 15. desember 1949, bind II.* 1949.
- [29] *Byggeforskrifter av 1. august 1969, med endringer sist av 7. oktober 1983.* .
- [30] *Byggeforskrift 1985*, vol. FOR 1985-11-15 nr 1892. 1984.
- [31] *Byggeforskrift 1987*, vol. FOR 1987-05-27 nr 0458. 1987.
- [32] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, Klima- og miljødepartementet, *Forskrift 22. januar 1997 nr. 33 om krav til byggverk og produkter til byggverk (Forskrift om krav til byggverk, TEK97).* 1997.
- [33] Statens bygningstekniske etat, *REN - Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997.* 1997.
- [34] Statens bygningstekniske etat, *REN - Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997. 4.utgave.* 2007.
- [35] B. Fuster *et al.*, “Guidelines and recommendations for indoor use of fuel cells and hydrogen systems,” *Spec. Issue 6th Int. Conf. Hydrog. Saf. ICHS 2015 19-21 Oct. 2015 Yokohama Jpn.*, vol. 42, no. 11, pp. 7600–7607, Mar. 2017.
- [36] W. M. Pitts, J. C. Yang, M. Blais, and A. Joyce, “Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, pp. 17457–17469, 2012.
- [37] “Methods to Determine Structural Responses.” [Online]. Available: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/StructuralResponse>. [Accessed: 09-Jan-2018].
- [38] R. M. Jeffries, L. Gould, D. Anastasiou, and A. P. Franks, *Derivation of fatality probability functions for occupants of buildings subject to blast loads.* 1997.
- [39] J.-B. Saffers, “Principles of Hydrogen Safety Engineering,” University of Ulster, 2010.
- [40] P. Turgut, M. A. Gurel, and R. K. Pekgokgoz, “LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 32, pp. 220–235, 2013.
- [41] H. Hundseid, “Human Resistance Against Thermal Effects, Explosion Effects, Toxic Effects and Obscuration of Vision,” DNV Technica and Scandpower, 2001.
- [42] F. Verbecke and A. Duclos, “HyResponse - Detailed scenarios of typical accident for selected FCH systems and infrastructures. Report D2.2,” Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, D2.2, 2015.
- [43] E. G. Merilo, M. A. Groethe, J. D. Colton, and S. Chiba, “Experimental study of hydrogen release accidents in a vehicle garage,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, pp. 2436–2444, 2011.

- [44] R. K. Kumar, "Vented Turbulent Combustion of Hydrogen-Air Mixtures in A Large Rectangular Volume," presented at the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2009.
- [45] 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.
- [46] L. C. Shirvill, T. A. Roberts, and M. Royle, "Safety studies on high-pressure hydrogen vehicle refuelling stations: Releases into a simulated high-pressure dispensing ara," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, pp. 6949–6964, 2012.
- [47] O. K. Sommersel, D. Vaagesaether, and D. Bjerketvedt, "Hydrogen explosions in 20' ISO container," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, pp. 7740–7748, 2017.
- [48] Y. Tamura, M. Takeuchi, and K. Sato, "Effectiveness of a blower in reducing the hazard of hydrogen leaking from a hydrogen-fueled vehicle," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, pp. 20339–20349, 2014.
- [49] H. Y. Bie and Z. R. Hao, "Simulation analysis on the risk of hydrogen releases and combustion in subsea tunnels," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, pp. 7617–7624, 2017.
- [50] T. Tanaka, T. Azuma, J. A. Evans, P. M. Cronin, D. M. Johnson, and R. P. Cleaver, "Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model," *ICHES-2005*, vol. 32, no. 13, pp. 2162–2170, Sep. 2007.
- [51] Z. Y. Li, D. Makarov, and J. Keenan, "CFD study of the unignited and ignited hydrogen releases from TPRD under a fuel cell car," presented at the International conference on hydrogen safety, Yokohoma, Japan, 2015.
- [52] "2017 Toyota Mirai Fuel Cell Vehicle." [Online]. Available: <https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>. [Accessed: 30-Nov-2017].
- [53] V. Molkov and S. Kashkarov, "Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, no. 36, pp. 12581–12603, Sep. 2015.
- [54] Y. Tamura and K. Sato, "The possibility of an accidental scenario for marine transportation of fuel cell vehicle: Hydrogen releases from TPRD by radiant heat from lower deck," *Int. J. Hydrog. Energy*.
- [55] P. Breuer, "Modelling the thermo-mechanica behaviour of high pressure vessel in composite materials when exposed to fire conditions," FireComp, D6.6, 2014.
- [56] V. Molkov, *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I*. bookboon.com, 2012.
- [57] S. Bertau, "HyResponse - European Emergence Response Guide. Report D6.3," Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, D6.3, 2016.
- [58] T. Skjold, D. Siccama, H. Hisken, M. Brambilla, and P. Middha, "3D risk management for hydrogen installations," *Int. J. Hydrog. Energy*, pp. 1–10, 2016.
- [59] R. Dey, "HyIndoor - D6.1 Report on reccomendations for RCS," D6.1, 2013.
- [60] A. Rodionov, H. Wilkening, and P. Moretto, "Risk Assessment of Hydrogen Explosion for Private Car with Hydrogen-Driven Engine," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, pp. 2398–2406, 2011.

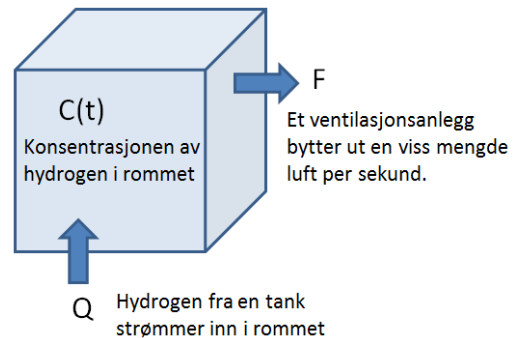
A Akkumulering og fortykning av hydrogen

Vi har laget en enkel modell for å vise hvordan hydrogen kan akkumuleres i et ventilert rom. Modellen tar inn en viss mengde hydrogen per tid som umiddelbart blandes med luft. Et ventilasjonsanlegg fjerner en gitt mengde hydrogen blandet med luft og bytter ut denne med frisk luft. Når 5 kg hydrogen er brukt opp, er det kun ventilasjonsanlegget som går. Modellen er som følger:

$$C(t) = \frac{Q}{F(A)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{F(A)t}{V}}\right), \quad 0 \leq t \leq t_1$$

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-\frac{F(A)t}{V}}, \quad t > t_1$$

Der C er hydrogenkonsentrasjonen i rommet, Q [L/s] er lekkasjeraten, F(A) [L/s] er ventilasjon, t [s] er tiden og V [L] er volumet. t_1 [s] er tiden der tanken går tom.



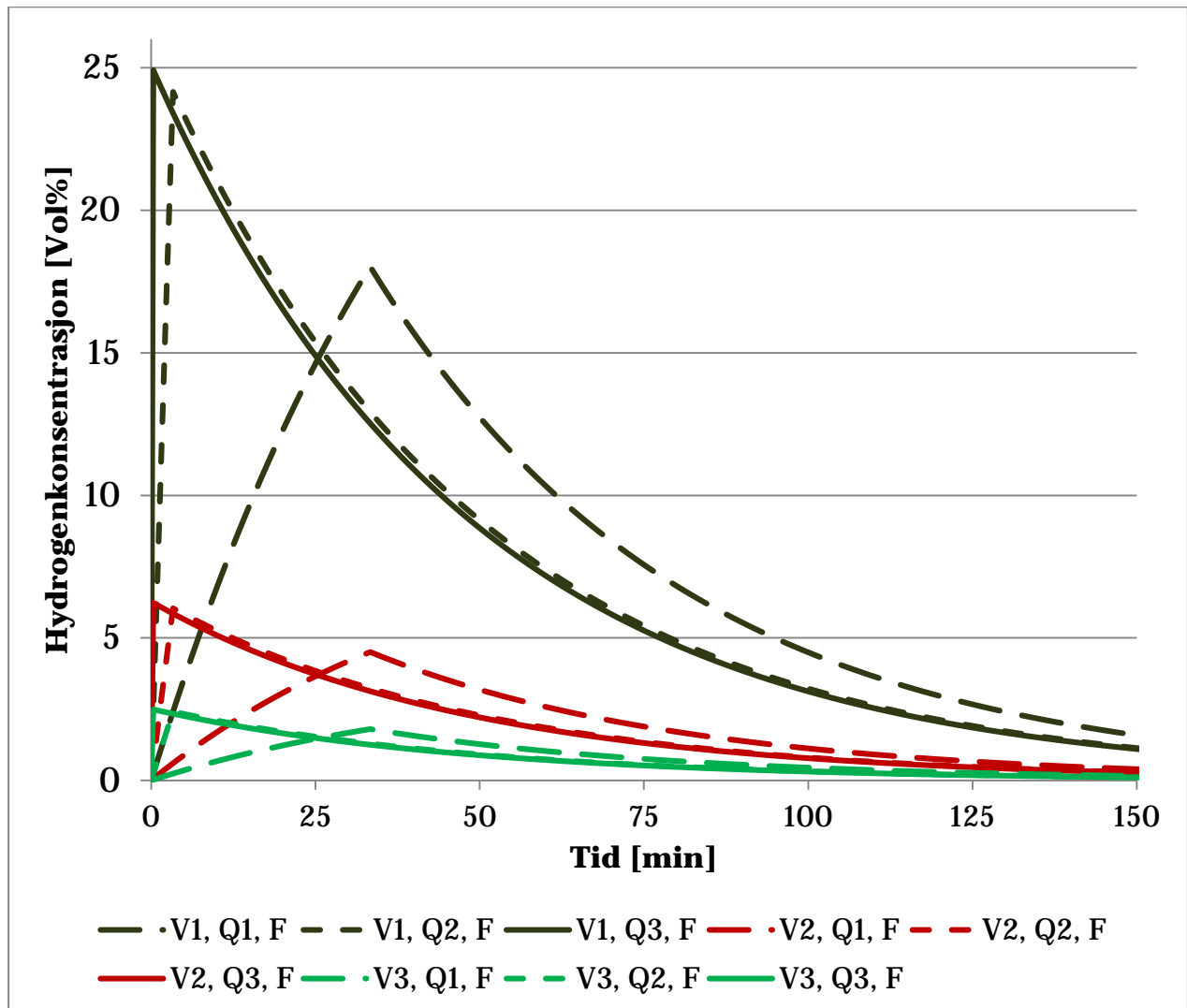
Følgende parametere er brukt:

Lekkasjerater		Tilsvare	Varighet for å nå et utslipp på 5 kg	Tilsvare
Q1	30 L/s	2,5 g/s	2000 s	En liten lekkasje fra slanger, koblinger osv.
Q2	300 L/s	25 g/s	200 s	Utslipp fra TPRD ved liten diameter (ca. 2 mm)
Q3	3000 L/s	250 g/s	20 s	Utslipp fra TPRD ved stor diameter (ca. 5 mm)

Volum	[L]	[m ³]	Areal [m ²]
V1	240 000	240	100
V2	960 000	960	400
V3	2 400 000	2400	1000

Ventilasjon	[L/s]	Tilsvare
F(A)	0,8333 [L/(s·m ²)] · Areal [m ²]	Tilsvare eksosventilasjon for korttidsparkering i en parkeringskjeller med takhøyde 2,4 m

Modellen forenkler ved å anta at det er lik hydrogenkonsentrasjon i hele volumet. I virkeligheten vil det være høyere konsentrasjon jo nærmere utslippet man kommer, og lokalt kan man ha konsentrasjoner som er mange ganger det som vises i grafen. Modellen antar også at det kun er ventilasjonen som fortynner konsentrasjonen. I virkeligheten vil for eksempel en åpen port bidra til å fortynne konsentrasjonen. Beregningene ved bruk av modellen er ikke ment å gi eksakte svar på hvilke konsentrasjoner som kan oppstå, men gi et grovt anslag på hva vi kan forvente ved gitte parametere.



Figur A-1 Akkumulering og reduksjon av hydrogen i et lukket rom under gitte lekkasje- og ventilasjonsforhold.

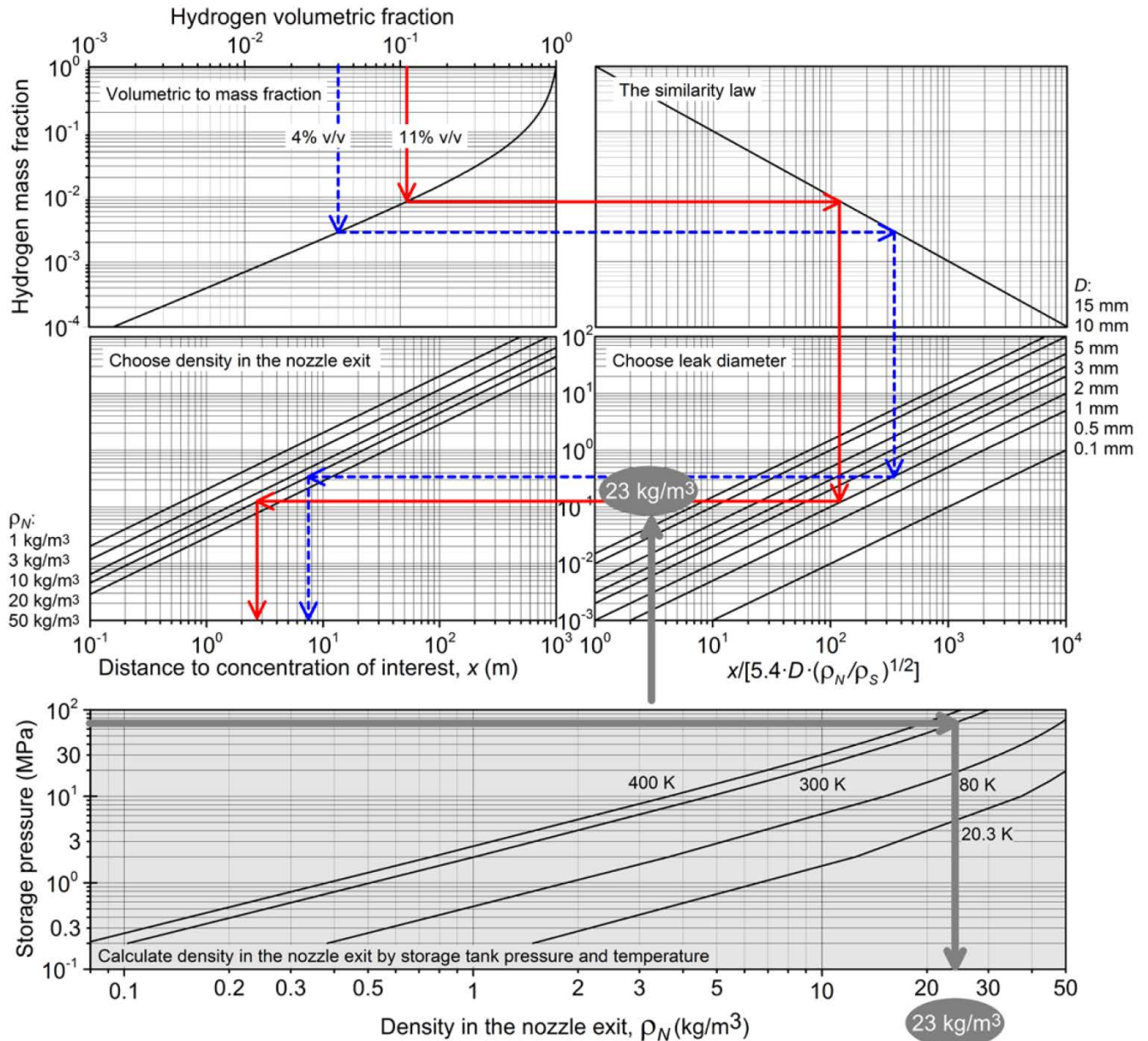
Modellen viser at i et lite volum med grunnflate 100 m² vil selv en mindre lekkasje kunne føre til en hydrogenkonsentrasjon med høye konsentrasjoner. I et volum med grunnflate 400 m² vil alle lekkasjeratene kunne føre til en konsentrasjon som er brennbar (>4%), men det er ikke forventet at de vil gi store overtrykk siden konsentrasjonen er godt under 10 %. I volumet med grunnflate 1000 m² vil ingen av utslippene gi en konsentrasjon som gir en brennbar hydrogenkonsentrasjon.

Resultatene fra modellen er basert på en rekke forenklinger, og er kun ment som et grovt anslag for hva et hydrogenutslipp kan føre til. De må derfor brukes med forsiktighet. Siden modellen antar at konsentrasjonen er homogen i hele volumet, vil den være mer nøyaktig for små romvolum og ved små utslipp.

Eksempelvis vil et utslipp der hele tankens innhold slipper ut i løpet av noen få sekunder, alltid ha brennbare konsentrasjoner i nærheten av tanken en tid like etter utslippet, uavhengig av hvor stort volumet er. Modellen viser også at ved store utslipp vil det ta lang tid før gassen blir ventilert ut.

B Sikkerhetsavstander til hydrogen jetbrann

Dersom man kjenner til diameteren på TPRD-en og trykket på hydrogentanken, kan man beregne konsentrasjonen i et gassutslipp for en gitt avstand. Framgangsmåten er gitt i Figur B-1 med et regneeksempel på neste side.



Figur B-1 Nomogram for beregning av hydrogenkonsentrasjoner ved ulike avstander. Figuren er hentet med tillatelse fra [56].

Eksempel:

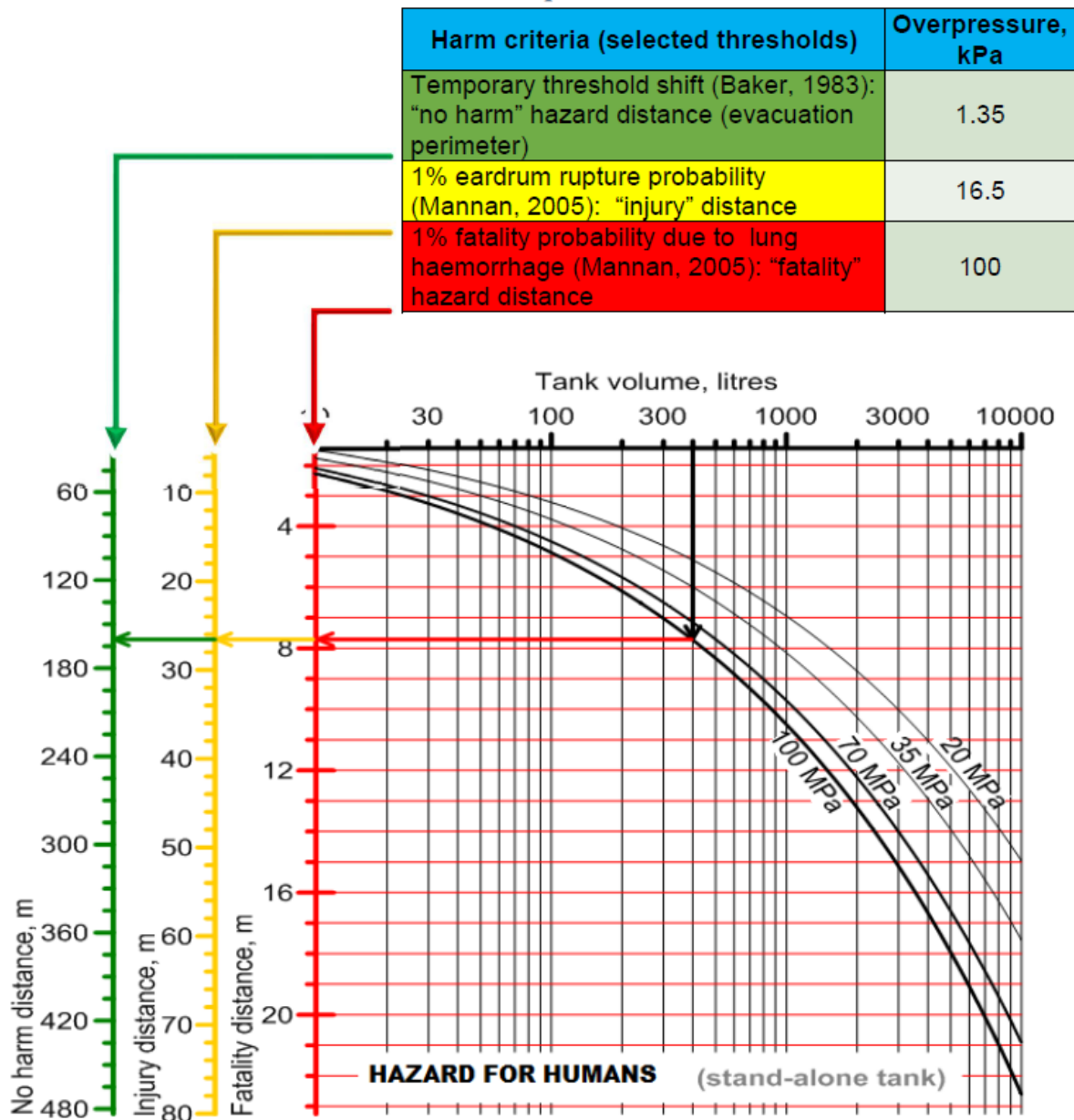
Vi er interessert i å finne ut ved hvilken distanse fra dysa konsentrasjonen er henholdsvis 4 og 11 %. Grunnen til at disse konsentrasjonene er interessante, er at lengden av en gjennomsnittlig hydrogen-jetflamme slutter ved 11 %, og nedre eksplosjonsgrense for hydrogen er 4 %. Disse verdiene kan også brukes som en sikkerhetsavstand for personer.

1. Først må man trekke en linje fra «Hydrogen volumetric fraction» som angir volumkonsentrasjonen til linja i kurven for å finne «Hydrogen mass fraction», altså massekonsentrasjonen til hydrogen i luft. I vårt eksempel har vi valgt 4 og 11 %.
2. Deretter trekkes en vannrett linje bort til nabodiagrammet til den møter en ny linje, kalt «The similarity law», likhetsloven.
3. Deretter trekkes en loddrett linje ned til linjen som angir riktig diameter for TPRD-en. I vårt eksempel har vi valgt en TPRD med 1 mm diameter.
4. Videre er det nødvendig å beregne densiteten til hydrogen. Dette finnes ved å benytte den nederste grafen. Ved 700 bar og 27 °C (300 K) er densiteten ca. 23 kg/m³.
5. Fra valgt TPRD-diameter trekkes en vannrett linje til tilhørende densitet. Valgt densitet resulterer i en avstand på ca. 7,7 m fra dysa til konsentrasjonen er 4 %, og en avstand på 2,7 m fra dysa til konsentrasjonen er 11 %. Ved nøyaktige beregninger (istedenfor å benytte nomogrammet) blir tallene 8,36 m til 4 % og 2,83 m for 11 %. Med andre ord er feilen ved bruk av nomogrammet rundt 10 %, som vi anse som akseptabel for et estimat.

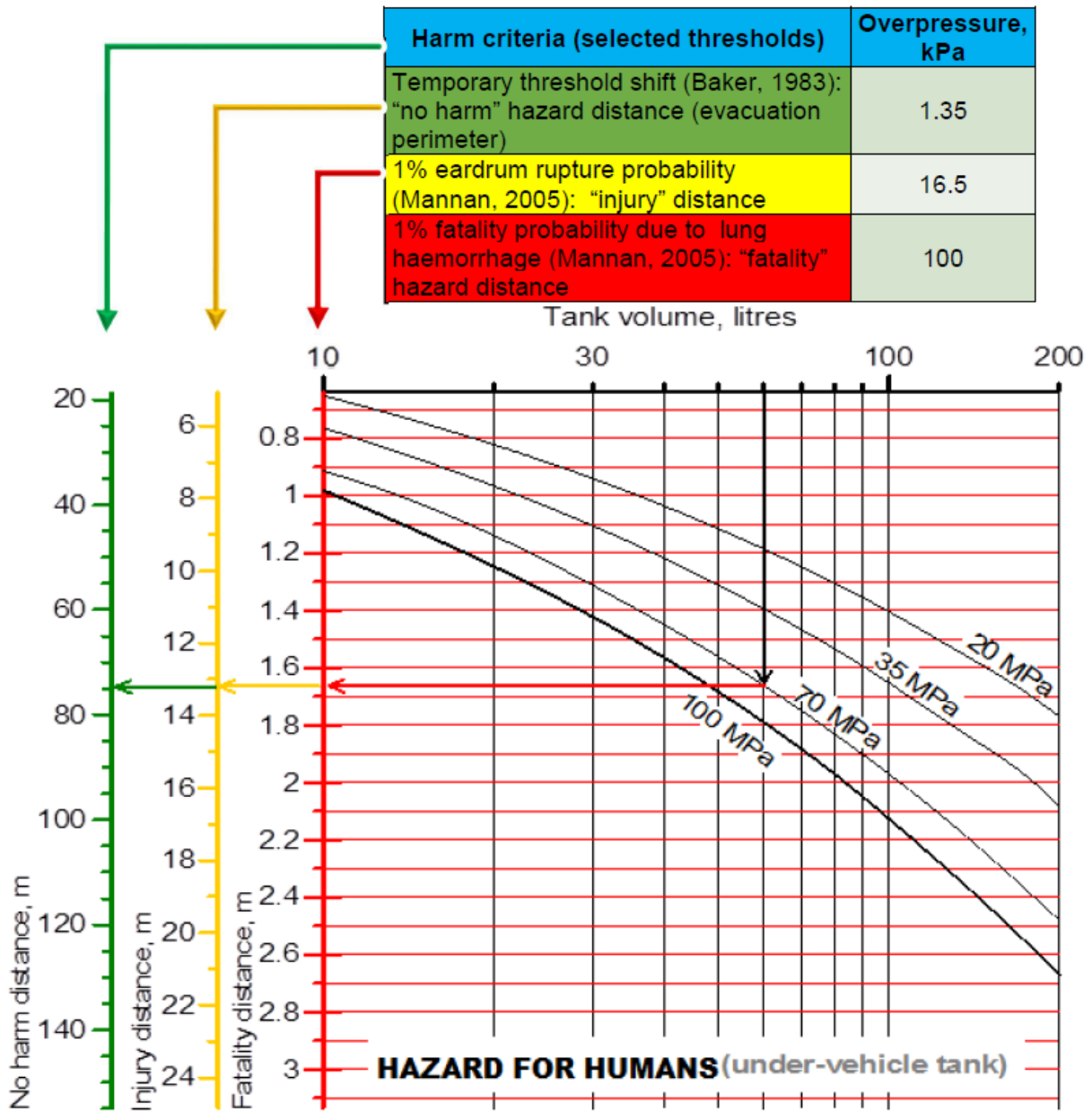
(Eksempelet er oversatt fra engelsk fra [56])

C Sikkerhetsavstander ved revning av hydrogentank

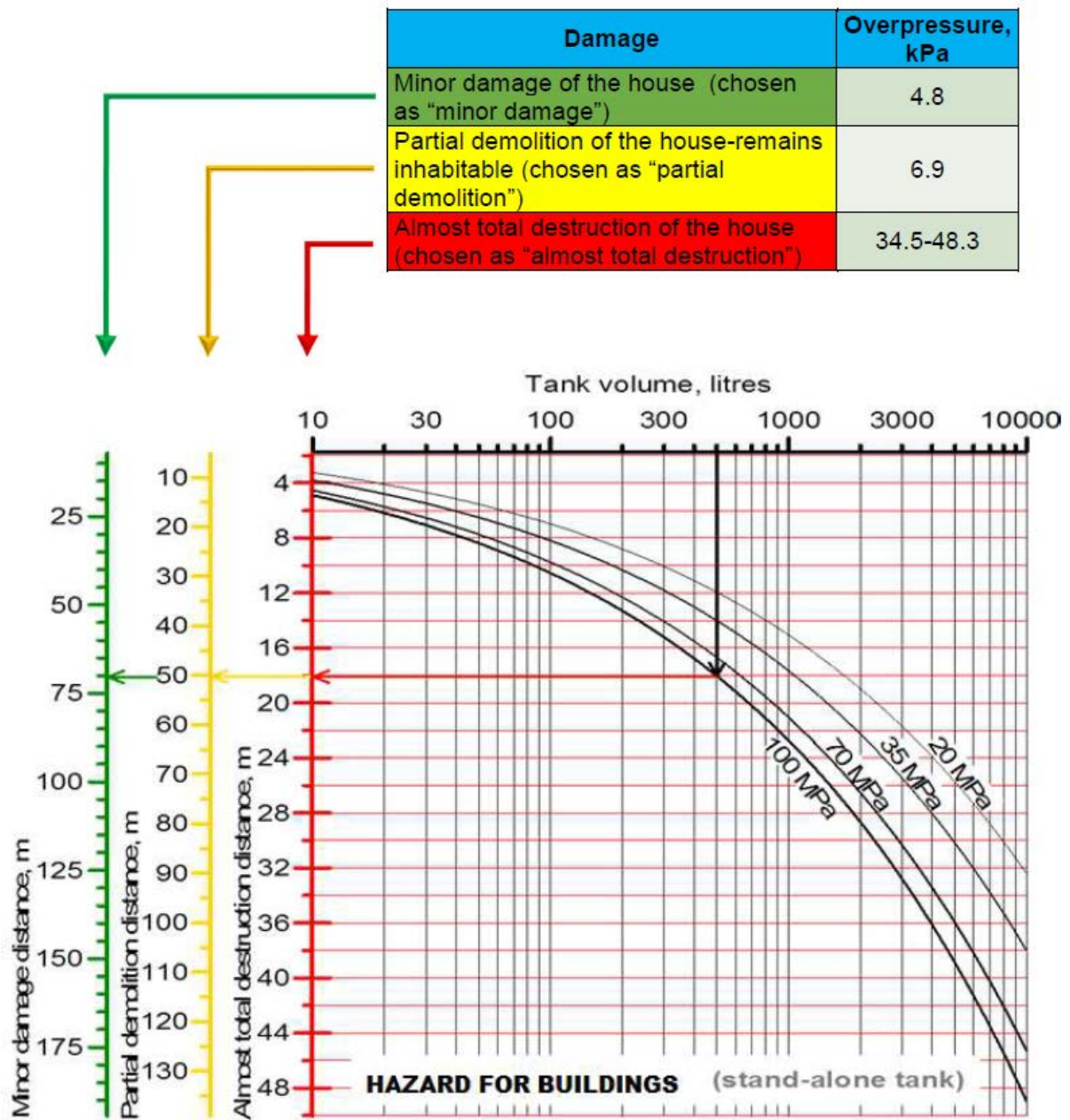
I Figur C-1 til C-4 er det gitt diagrammer som angir ulike sikkerhetsavstander i scenariet der en hydrogentank revner. Modellen er laget på et noe tynt datagrunnlag, og må brukes med en viss varsomhet.



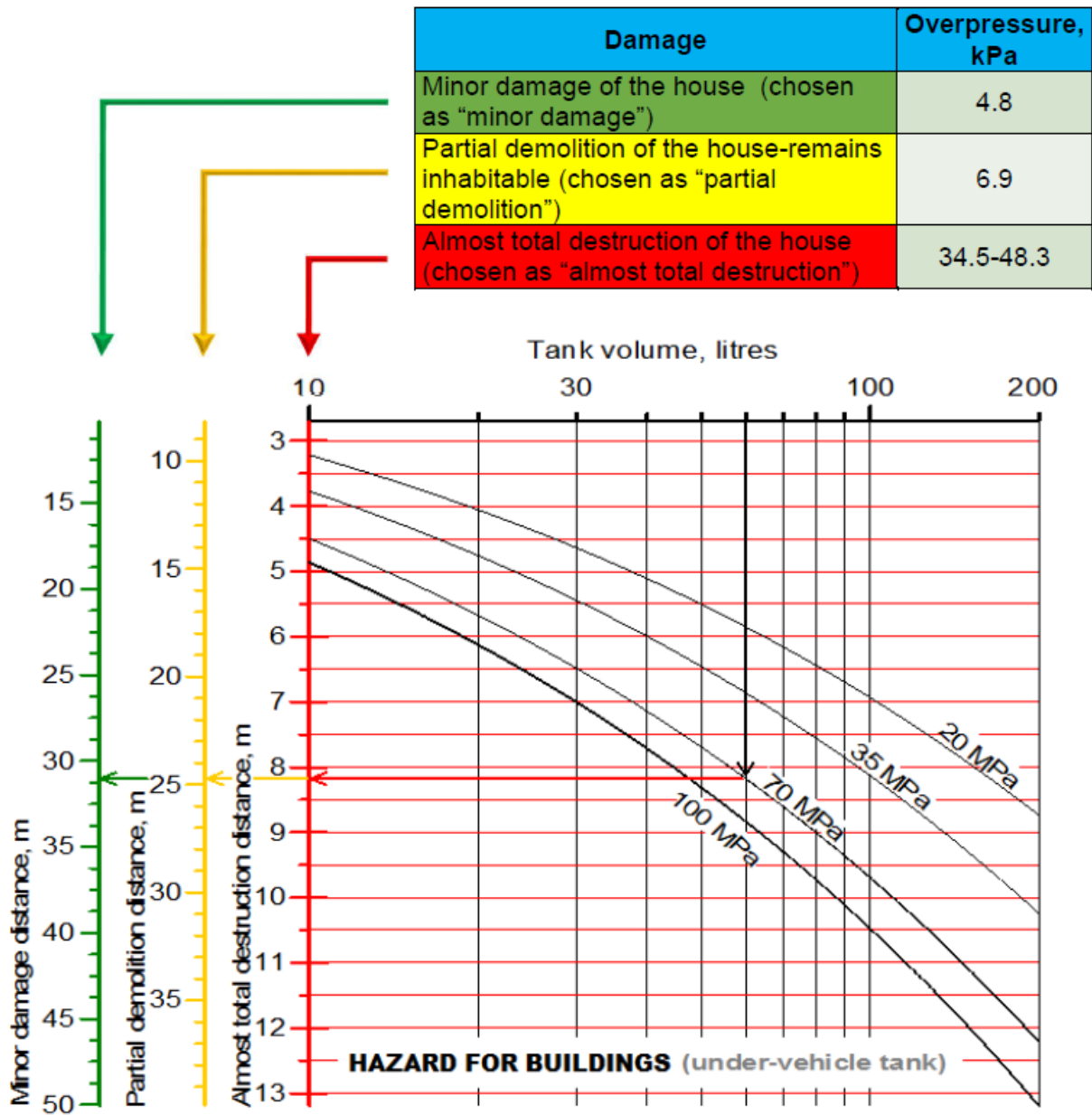
Figur C-1 Sikkerhetsavstander for mennesker ved revning av en frittstående tank ved valgt tankvolum og trykk. Figuren er hentet med tillatelse fra [57].



Figur C-2 Sikkerhetsavstander for mennesker ved revning av en tank montert under kjøretøy ved valgt tankvolum og trykk. Figuren er hentet med tillatelse fra [57].



Figur C-3 Sikkerhetsavstander for bygninger ved revning av en frittstående tank ved valgt tankvolum og trykk. Figuren er hentet med tillatelse fra [57].



Figur C-4 Sikkerhetsavstander for bygninger ved revning av en tank montert under kjøretøy ved valgt tankvolum og trykk. Figuren er hentet med tillatelse fra [57].



RISE Fire Research AS

Postadresse: Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim
Telefon: 464 18 000
E-post: post@risefr.no
Internett: www.risefr.no

**RI
SE**