



Myndigheten för  
samhällsskydd  
och beredskap

Beräkningsunderlag

# Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer



## **Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer**

Tidsperiod: 2022-2023

Utförare: Avdelningen för Brandteknik, Lunds universitet

Ansvarig: forskare/författare Marcus Runefors

### Kort sammanfattning

Denna rapport redovisar beräkningar avseende skyddsavstånd från vätgasinstallationer. Resultaten utgör förslag till kommande revidering av MSBFS 2020:1 och kan även användas som underlag för enskilda projekt.

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

MSB:s Kontaktpersoner: Carina Fredström, 010-240 5065, Rickard Granevald, 010-2405415

Foto omslag: Bing Creative Commons

Text: Marcus Runefors

Tryck: DanagårdLITHO

Publ. nr: **MSBxxxxx - månad år**

Tidigare utgiven: -

ISBN: **ISBN**

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport (alt. studierapport). Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

# Förord

I samband med den gröna omställningen så kommer vätgasinstallationer allt närmare tätbebyggda områden. Det är därför viktigt med väl underbyggda skyddsavstånd som tillförsäkrar att installationerna kan utföras på ett säkert sätt och samtidigt inte hindrar utvecklingen genom att använda överkonservativa antaganden i beräkningarna.

Denna rapport innehåller ett förslag på ramverk för skyddsavstånd som avses kunna användas som underlag för framtida revideringar av MSBFS 2020:1, men också i enskilda projekt. I rapporten presenteras dels färdiga tabeller med avstånd, men också de dimensionerande skadefallen som ligger bakom och som därmed kan användas för egna beräkningar, t.ex. med CFD-modeller.

Lund, 2023-02-20



Marcus Runefors

Avdelningen för Brandteknik, Lunds universitet

# Innehåll

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PÅVERKAN FRÅN VÄTGASLAGRET PÅ OMGIVNINGEN .....</b>	<b>7</b>
2.1	Dimensionerande scenarier .....	7
2.2	Förutsättningar och antaganden .....	12
2.3	Skyddsmål .....	12
2.4	Skadekriterier per målkategori.....	14
2.5	Dimensionerande skadefall per skyddsmål .....	17
2.6	Påverkan av detektion och automatisk isolering.....	19
2.7	Beräkning av avstånd till olika påverkan .....	22
2.8	Sammanställning av avstånd .....	24
<b>3</b>	<b>PÅVERKAN FRÅN OMGIVNINGEN PÅ VÄTGASLAGRET .....</b>	<b>26</b>
3.1	Kritisk påverkan på stålbehållare .....	26
3.2	Kompositbehållare .....	28
3.3	Påverkan från brand i byggnad.....	28
3.4	Påverkan från ansamling av brännbart material.....	29
3.5	Fordon.....	31
3.6	Skogsbrand .....	31
3.7	Övrigt .....	33
<b>4</b>	<b>PÅVERKAN AV MURAR OCH ANDRA AVSKILJNINGAR .....</b>	<b>34</b>
4.1	Skydd mot påverkan från anläggning till omgivning .....	34
4.2	Skydd mot påverkan från omgivning mot anläggning.....	36
4.3	Behov av motståndskraft .....	37
4.4	Sammanställning avseende barriärer.....	38
<b>5</b>	<b>SAMMANSTÄLLNING FÖR FÖRENKLAD OCH ANALYTISK DIMENSIONERING AV AVSTÅND .....</b>	<b>40</b>
5.1	Påverkan från lagret och ut .....	40
5.2	Påverkan från lagret och ut .....	43
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>FÖRSLAG TILL VIDARE STUDIER .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>REFERENSER .....</b>	<b>46</b>
	<b>BILAGA A – BERÄKNINGSMETOD FÖR STÅLBEHÅLLARES MOTSTÅNDSKRAFT MOT INFALLANDE STRÅLNING .....</b>	<b>48</b>

# 1 Inledning

En av de största frågorna vid etablering av nya vätgasanläggningar är vilka avstånd som krävs till olika objekt i närområdet eftersom det dels påverkar hur fastigheten disponeras. Kraven på skyddsavstånd kan även innebära att det inte alls går att etablera anläggningen på grund av korta avstånd till närliggande bebyggelse eller annat i närområdet.

Avståndet bestäms av två faktorer, dels om en brand i omgivningen kan påverka vätgasanläggningen så att den finns risk för en eskalation i form av t.ex. en tankruptur och dels om ett läckage på vätgasanläggningen kan hota människor eller byggnader i närområdet. Principen illustreras i nedanstående figur.



**Figur 1.** Skyddsavståndet bestäms både av en brand i omgivningen och ett utsläpp på anläggningen.

Avstånden regleras av MSB:s författning MSBFS 2020:1 där det finns ett allmänt råd som innehåller tabeller för gasolcisterner samt för lösa behållare. För den förstnämnda anges en begränsning till lagring av just gasol medan den andra inte har någon uttrycklig begränsning i vilken typ av brandfarlig gas som lagras. Det kan dock konstateras att reglerna ursprungligen togs fram med gasol i åtanke. Dessutom är den största volym som anges i tabellen 8000 liter geometrisk volym.

Utöver att tabellerna är framtagna för en annan gas än vätgas är det även svårt att härleda bakgrunden till de avstånd som anges i tabellen. Tabellen har också flera ologiskheter i form av att tryck och rördimensioner (som är dimensionerande för påverkan på omgivningen) inte regleras utan bara volym. Det finns också anekdotiska beskrivningar om att verksamheter ökar lagringstrycket för att få ner den komprimerade volymen vilket de facto ökar risken. Även när det gäller påverkan på lagret från omgivningen är logiken svår att återskapa då ett större tryckkärl (av stål) klarar en högre strålningspåverkan än ett mindre vilket är tvärt emot hur avstånden förändras i tabellen.

Eftersom vätgas inte regleras av tabellerna i MSBFS 2020:1 så ska skyddsavstånden avgöras genom riskutredningen. Detta är emellertid mycket svårt i praktiken eftersom ett skyddsavstånd normalt behöver baseras på ett visst dimensionerande skadefall (dvs hålstorlek), men det saknas vägledning för hur ett sådant ska väljas. Enligt IVA (1981) definieras ett dimensionerande skadefall som

”det största troliga utsläppet”, men vad innebär det i praktiken? Avstånden kommer att bli markant annorlunda om de baseras på 1% av tvärsnittsarean av det största röret (som NFPA 2:2023 anger) eller 10% (som anges som exempel i bilaga A i ISO 19880-1:2022).

Ett alternativ till dimensionerande skadefall som används i många länder (t.ex. Norge och Nederländerna) är kvantitativ riskanalys där sannolikheter och frekvenser används för att beräkna individ- eller samhällsrisker som sedan jämförs med ett acceptanskriterium. Fördelen med kvantitativ riskanalys är att den tar hänsyn till hela utfallsrymden, men nackdelen är att den är väldigt arbetsintensiv och dessutom känslig för val av indata. Det kan i vissa fall vara motiverat att göra en full kvantitativ riskanalys för stora och unika anläggningar (t.ex. Hybrit), men det är sannolikt inte önskvärt att kräva att det genomförs för varje mindre anläggning. Utöver kostnaden för analysen och känsligheten för indata så finns också problemet att skyddsavstånden inte kan fastställas förrän sent i processen då det kan vara svårt att genomföra stora förändringar i anläggningen.

Syftet med denna rapport är att ge ett förslag på skyddsavstånd för vätgasanläggningar av olika slag. Beräkningsmodellerna som har använts är vedertagna modeller baserade på analytiska uttryck. Inga CFD-analyser genomförts för denna rapport. Fördelen med CFD-analyser är främst att de kan ta hänsyn till den specifika geometrin runt anläggningen, men eftersom syftet är att ta fram generiska avstånd så har inte det varit nödvändigt. Det kan i vissa fall vara motiverat att genomföra CFD-analyser för specifika objekt för att kunna anpassa nedanstående avstånd och då kan denna rapport fungera som en källa för dimensionerande skadefall att använda som indata i en sådan analys.

Rapporten innehåller också vissa bedömningar gällande skyddsmål, dimensionerande hålstorlekar och kopplingen mellan dessa. Bedömningen har gjorts av rapportförfattaren, men har i möjligaste utsträckning baserats på praxis och andra standarder. Det kan dock vara så att modifieringar kan behöva göras i vissa specifika projekt.

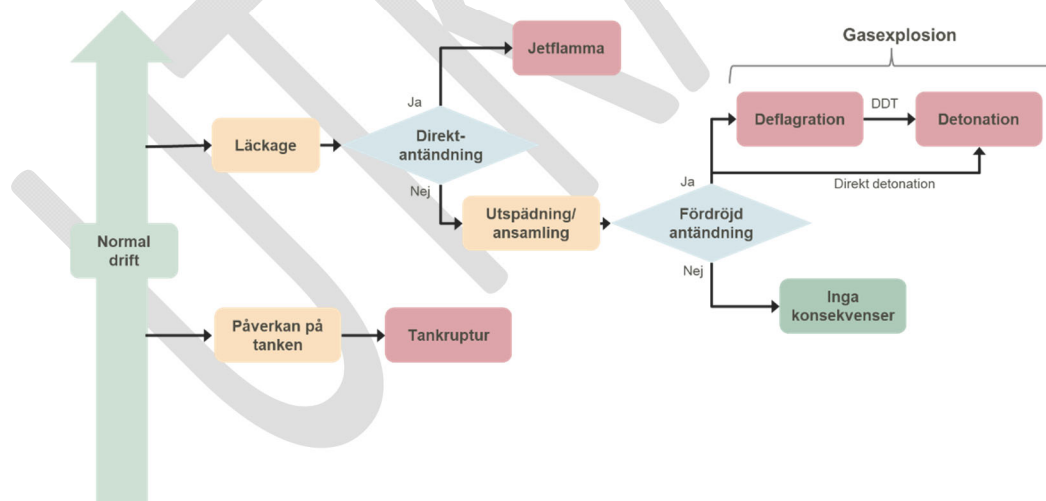
Vägledning angående avstånd finns även i H<sub>2</sub>-TSA riktlinjerna från Energigas Sverige som i skrivande stund är under slutförande. De avstånden är dock specifika för tankstationer och vilar på delvis andra bedömningar än de i innevarande rapport. Det är alltid ytterst den som vill uppföra en anläggning (normalt med stöd av konsulter) och tillståndsmyndigheten som väljer vilka avstånd som man väljer att luta sig mot. Det samma gäller även vid eventuella hänvisningar i föreskrifter från myndigheter.

## 2 Påverkan från vätgaslagret på omgivningen

I detta kapitel analyseras hur olika olycksfall inom vätgassystem kan påverka olika skyddsmål i omgivningen och vilka avstånd som krävs för att undvika detta.

### 2.1 Dimensionerande scenarier

Första steget är att kartlägga vilka scenarier som ska ligga till grund för avståndsdimensioneringen. Syftet med denna rapport är inte att utgöra en lärobok i vätgassäkerhet utan för detta hänvisas till andra källor (t.ex. Kotchourko och Jordan (2022) eller Molkov (2012)) och därför görs ingen fullständig beskrivning av de olika scenarierna. En översiktlig bild av relevanta utfall ges dock i Figur 2.



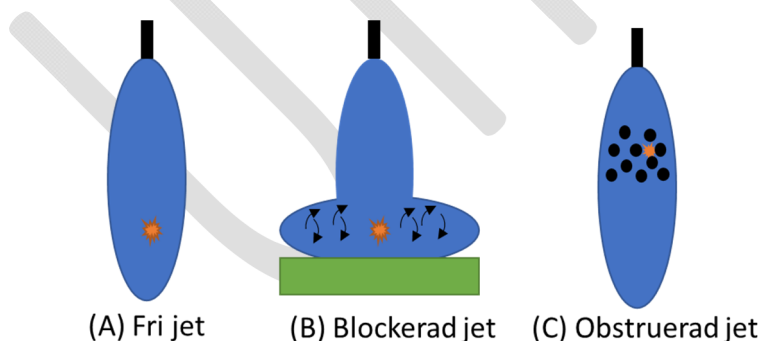
**Figur 2.** Sammanställning av olika olycksscenarier kopplat till vätgashantering. DDT är ett händelseförlopp där en deflagration accelererar och övergår i detonation.

Tankruptur kan inträffa på grund av extern brand, mekanisk påverkan på tanken eller (i vissa fall) överfyllnad. Konsekvensen blir en tryckvåg när gasen expanderar samtidigt som vätgasen förbränns i ett eldklot. På grund av vätgasens reaktivitet så kommer även förbränningen bidra till tryckvågen. Risken för detta behöver

utredas i riskutredningen, men så länge lämpliga förbyggande åtgärder vidtas så bedöms sannolikheten för detta kunna bli så låg att det inte blir ett dimensionerande scenario. Alla behållare behöver emellertid skyddas mot påverkan från jetflammar i närliggande kopplingar<sup>1</sup> i enlighet med MSBFS 2020:1.

De andra scenarierna är kopplade till läckage på anläggningen. Om den utsläppta vätgasen antänds direkt så bildas en jetflamma som kan påverka omgivningen genom strålning och temperatur i såväl flamma som förbränningsprodukter. Om ingen direkt antändning sker så finns risk för en fördröjd antändning vilket kan innebära en tryckökning som kan skada både människor och byggnader. Skyddsavstånd inom ramen för denna rapport avser hantering utomhus och därför är ansamling i byggnader inte direkt relevant för denna rapport utan hanteras genom andra regler i MSBFS 2020:1 samt riskutredningen. Det förutsätts också att anläggningen är utförd så att ingen ansamling under skärmtak och dylikt sker samt att ingen instängning mellan väggar sker. Om ansamling förväntas kunna ske så antas eventuell tryckvåg riktas åt ett håll där inga skyddsmål finns eller att en särskild analys avseende skyddsavstånd för den aktuella byggnaden genomförs. Utan antändning så finns endast risk för låg syrenivå (<15%) eftersom vätgas inte har någon toxisk effekt. Låg syrenivå inträffar dock först när vätgaskoncentrationen är över 28% och är därmed inte dimensionerande.

En tryckökning kan även ske utan ansamling genom att jetutsläppet antänds med viss fördröjning så att en brännbar blandning har bildats i anslutning till utsläppet. Den höga reaktiviteten hos vätgas kombinerat med det breda brännbarhetsområdet och turbulensen hos utsläppet gör att denna tryckvåg i vissa fall kan innebära skador på omgivningen. Eftersom just turbulensen är av central betydelse för förbränningshastigheten så kan tre grundfall definieras enligt nedan.



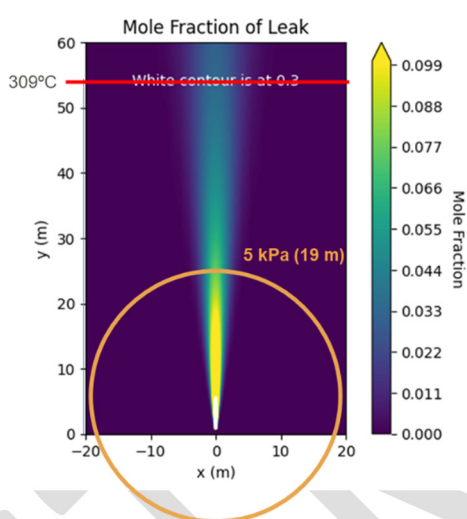
**Figur 3.** Typfall gällande fördröjd antändning av jetutsläpp. Orange markering indikerar plats för antändning.

Fall (A) är relativt väl beforskat och det har nyligen kommit ut en beräkningsmetod för just detta fall publicerad av Cirrone et al. (2022). Eftersom en

<sup>1</sup> I nuvarande regelverk så står det endast flänsar, men skrivningen bör tolkas så att även andra typer av förband inkluderas.

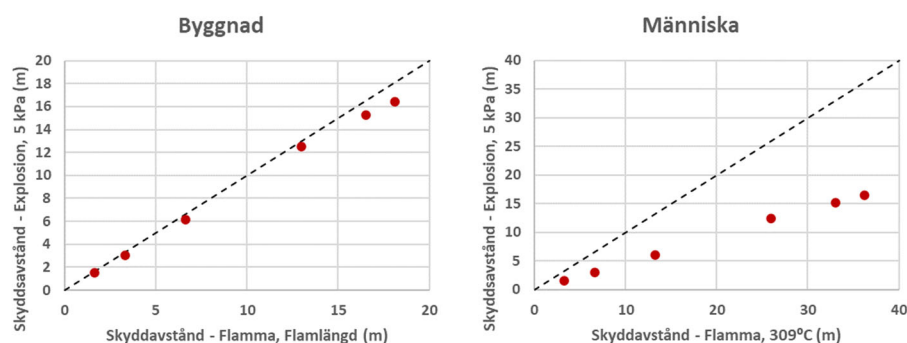


tryckvåg utbreder sig sfäriskt från antändningspunkten så kommer denna att påverka en relativt stor yta vilket är relevant för en kvantitativ riskanalys. När det gäller dimensionerande skadefall, som är grunden för denna rapport, så är dock frågan om en fördröjd antändning kan orsaka skador på längre avstånd för en given hålstorlek. Ett exempel på utsläpp presenteras i Figur 4 där avstånd till ett övertryck på 5 kPa (som är ett konservativt värde för skada på byggnad eller människa från IPS (Weibull, 2012)) jämförs med avstånd till 309°C i förbränningsprodukterna som ger tredje gradens brännskada efter 20 sekunder enligt Molkov (2012). Enligt Cirrone et al (2022) så blir riskområdet störst om antändning sker där jet:en har en koncentration på 60 vol-% och därmed ska cirkeln ha sitt centrum i den punkten.



**Figur 4.** Jämförelse mellan avstånd till 5 kPa vid en fördröjd antändning samt 309°C för en antänd jetflamma.

Det framgår att avståndet till skadliga förhållanden till följd av temperaturen är väsentligt mycket längre än den för tryckvågen. Om en mer systematisk jämförelse genomförs baserat på de fall som presenteras i Cirrone et al. (2022), som innehåller hål med diameter mellan 0,5 och 5 mm vid 700 bar samt 5 mm hål vid 350 och 950 bar, erhålls nedanstående figur. I denna jämförelse sätts skadekriteriet för jetflamma på 309°C för människor och flamlängden för byggnader (se 2.4). När det gäller tryck så finns många olika acceptanskriterier i litteraturen, men i nedanstående jämförelse används 5 kPa baserat på rekommendation från IPS (Weibull, 2012) vilket är förhållandevis lågt i förhållande till de 16,5 kPa som rekommenderas i Cirrone et al. (2022).



**Figur 5.** Skyddsavstånd för olika fall (prickar) baserat på flamma (x-axel) respektive explosionstryck (y-axel). Punkter under den streckade linjen innebär att avstånd baserat på flamma blir dimensionerande.

Det framgår av ovanstående figur att skyddsavståndet för det antända fallet i samtliga fall blir motsvarande eller längre än den för tryckpåverkan. Det innebär att avstånd baserat på fördröjd antändning av fri jet inte behöver beräknas i den fortsatta analysen.

När det gäller fall (B) i Figur 3 så finns det en försöksserie publicerad av Willoughby et al. (2011) med utsläpp som har en diameter på 3,2, 6,4 respektive 9,5 mm från en reservoar på 200 bar. Utsläppet träffade en vägg som antingen var rak eller lutade 30° bakåt. Bortsett från påverkan på själva väggarna (som diskuteras i kapitel 4.1) så uppmättes maximalt 22 kPa för den raka väggen och 29 kPa för den lutande väggen. Dessa tryck uppmättes på väggen vid vilken dysan var monterad. Trycket parallellt med väggen framgår inte av rapporten, men var lägre. Nedströms barriären (dvs på baksidan) var de högsta trycken 8,9 kPa respektive 9,4 kPa. Avståndet mellan utsläppet och väggen var 1,2 meter. Om flaman inte hade träffat en vägg så hade allvarliga konsekvenser (baserat på 309°C enligt ovan) kunnat inträffa på 39,6 m avstånd. På detta avstånd är det uppenbart att ingen tryckverkan är relevant eftersom det är 39,6 meter från ett tryck på maximalt 9,4 kPa. I de försöken är därmed inte det blockerade jetutsläppet dimensionerande. Heuf et al (2008) och LaChance et al. (2010) har gjort simuleringar i FLACS för varierande tryck upp till 1035 bar och även de visar låga tryck bakom och vid sidan av barriären (<8 kPa). Det kan dock konstateras att en större tryckuppbyggnad i, vad man tror är, liknande typ av scenario kunde noteras vid explosionen i Sandvika 2019. Det bedöms dock, baserat på ovanstående resultat, inte huvudsakligen bero på att jetutsläppet träffade en yta utan att det även fanns en betydande ansamling av vätgas (motsvarande 13-18 m<sup>3</sup> stökiometrisk vätgas-luftblandning enligt Hansen (2019)). Att jetutsläppet antas ha träffat en yta kan dock ha inneburit att den inledande flamkärnan deformerats av turbulensen, men det bedöms som det omringande stora molnet med vätgas har varit en förutsättning för den förhållandevis stora konsekvensen<sup>2</sup>. Det understryker således vikten av att

<sup>2</sup> Det bör också noteras att en antänd och icke begränsad jetflamma med den bedömda hålstorleken enligt Hansen (2019) hade fått en jetflamma på 16 meter, 32 meter till 309°C och 48 meter till 115°C.

minimera instängningen av utsläppt vätgas mellan väggar vilket är en förutsättning för analysen i innevarande rapport och diskuteras mer i kapitel 2.2.

Slutligen finns fall (C) där vätgasutsläppet går in i ett område med en stor mängd obstruktioner som kan accelerera flamman. För deflagrationer så är det främst vätgasblandningen inom det obstruerade området som bidrar till tryckökningen, men om deflagrationen övergår i detonation (DDT) så bidrar även gasen utanför det obstruerade området till tryckökningen. Med hänsyn till att miljön där jetutsläppet befinner sig kan se ut på många sätt (t.ex. buskage) och att mängden tillgängliga försök är mycket liten (förutom för väl omblandade och stillastående gaser) så är det svårt att utesluta att detta kan bli dimensionerande i vissa fall. Därför kommer en konservativ ansats väljas där risken för gasexplosion behöver beaktas om en stor samling med obstruktioner (många "lager") som nås av vätgas med en koncentration på över 30%. Koncentrationen är baserad på att förbränningshastigheten för vätgas är som högst mellan 30-50% (Molkov, 2012) och att antändning i koncentrationer under 30% bara ger mycket låga explosionstryck (Jallais et al., 2018). Det bör dock noteras att detta främst är aktuellt vid mycket stora utsläpp eftersom hindren måste vara betydligt smalare än jetutsläppet (som är ca 18% av avståndet från utsläppskällan, enl Tang et al. (2018)) men samtidigt så breda att de accelererar flamman (vilket ofta tas till minst 10 cm i CFD-sammanhang). Lämplig lösning som ofta används inom industrin i dessa fall är antingen att ta bort hindren (t.ex. buskaget) eller att klä in en större ansamling med rör eller dylikt.

Sammanfattningsvis för samtliga fall med fördröjd antändning av vätgasjets så är kunskapsläget generellt svagt med relativt få utförda experiment förutom för fria jetutsläpp. För fria jetutsläpp (Fall A) kan man med relativt god säkerhet säga att den fördröjda antändningen av dessa inte blir dimensionerande. För jetutsläpp som träffar en vägg eller annan konstruktion (Fall B) finns det också tydliga tecken på att detta kommer att ge väsentligt kortare avstånd (så länge ansamlingen hindras i enlighet med kapitel 2.2) än både den fördröjda antändningen av det fria jetutsläppet och det antända fria fallet. Vid mycket stora utsläpp in i obstruerade områden (Fall C) kan det inte uteslutas att det blir dimensionerande i något fall och därför kommer en försiktighetsprincip appliceras där dessa hinder hanteras för koncentrationer över 30% om inte någon beräkning (t.ex. TNO eller CFD) kan visa att de inte blir dimensionerande.

## 2.2 Förutsättningar och antaganden

Följande förutsättningar måste vara uppfyllda för att kunna använda avstånden som presenteras i denna rapport.

- Hanteringen sker **utomhus eller i containrar/byggnader där människor normalt inte vistas**. Om hanteringen inte sker utomhus så antas containrar/byggnader att vara försedda med tryckavlastning som inte påverkar skyddsmålen eller att risken för konsekvenser till följd av deflagration i utrymmet hanteras på annat sätt.
- **Tankruptur förhindras** så att detta inte blir ett dimensionerande fall genom att de skyddas från jetflammar (inkl från kopplingar på egen eller intilliggande behållare) och utförs med smältsäkringar och/eller Leak-Not-Burst.
- **Ansamling av vätgas undviks** under t.ex. skärmtak och väderskydd
- **Instängning av vätgas mellan väggar/murar minimeras** genom att undvika fler än två sammanhängande väggar (dvs L-form) och vid tre sammanhängande väggar rikta den öppna sidan bort från skyddsmålen.

Krav vid hantering i byggnader där personer normalt vistas samt aspekter som inte rör skyddsavstånd (t.ex. märkning, kompetens) beaktas inte i denna analys utan förutsätts hanteras genom andra regler samt riskutredningen.

Observera att avstånden från anläggningen till omgivningen i kapitel 2 inte gäller själva tryckkärlet utan **alla kopplingar** (dock ej helsvetsade rör). Ingen hänsyn tas till om vissa komponenter bara vid vissa tillfällen är vätgasfyllda. Notera dock att det i många fall går att minska avstånd genom att automatiskt detektera och isolera läckage (se kapitel 2.6).

## 2.3 Skyddsmål

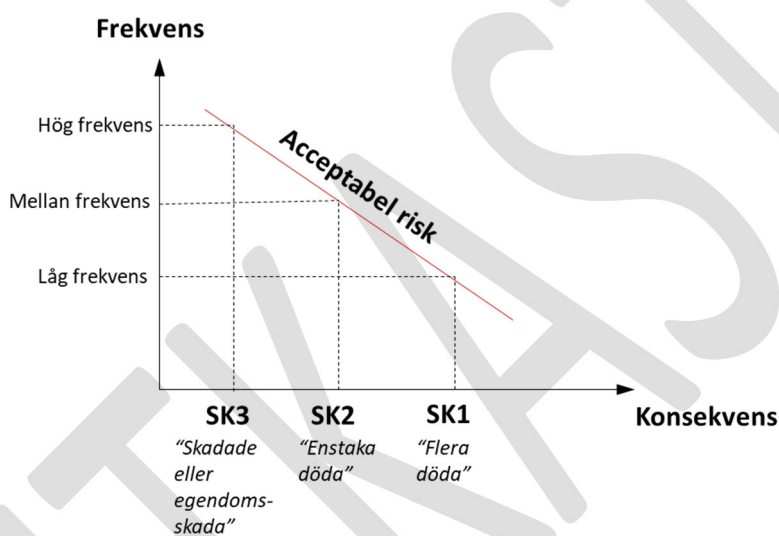
Traditionellt har främst byggnader setts som skyddsvärda i det svenska regelverket vilket skiljer det från, till exempel, NFPA 2 och ISO 19880-1 som i större utsträckning inkluderar människor. Bakgrunden till detta skulle kunna vara att regelskrivarna primärt velat skydda från att en brand i omgivningen påverkar tryckkärlen och/eller att avstånd till vissa andra skyddsmål (t.ex. människor) kan vara svårare att fastställa. I denna rapport har dock även skyddsmål i form av människor inkluderats.

För att fastställa nödvändigt avstånd till skyddsmål i de fall när en kvantitativ riskanalys inte har ansetts nödvändig används ofta ett s.k. dimensionerande skadefall som anses utgöra det ”*största troliga utsläppet*”. Som exempel antar NFPA 2 alltid ett läckage på 3% av tvärsnittsarean<sup>3</sup> oavsett vad som hotas och analysen

---

<sup>3</sup> Detta har sänkts till 1% i 2023-års utgåva.

skiljer sig endast i att olika skyddsmål har olika skadekriterier. I denna rapport används ett annat angreppssätt där konsekvensens allvarlighet påverkar den acceptabla frekvensen. I kvantitativa riskanalyser beskrivs detta ofta genom att FN-kurvan jämförs med en lutande linje som motsvarar den acceptabla risken. Översatt till en mer deterministisk kontext så innebär det att konsekvenserna vid ett litet hål (som har en stor sannolikhet) behöver vara mycket låga medan för ett stort hål (som är mycket osannolikt) så kan en större konsekvens accepteras. Detta illustreras i nedanstående figur där något som kallas skyddsklass (SK) definieras. I figuren innebär SK1 att det är ett skyddsmål som, om det påverkas, kan innebära att många personer omkommer medan SK3 normalt bara leder till egendomsskador eller enstaka skadade.



**Figur 6.** Samband mellan olika skyddsklasser och acceptabel sannolikhet för ett skadefall som påverkar skyddsklassen.

Givet hur de olika skyddsklasserna har definierats skulle nedanstående skyddsmål kunna definieras. I definitionen används verksamhetsklasserna från BBR eftersom dessa entydigt definieras för varje uppförd byggnad och definitionerna är välkända bland brand- och riskkonsulter och underlättar därför användningen. De verksamhetsklasser som används är samlingslokaler över 150 personer (Vk2B och Vk2C) samt lokaler där personerna inte kan förväntas utrymma själva, (t.ex. äldreboenden, sjukhus och fängelser) (Vk5B till Vk5D).

I vissa fall kan det utöver nedanstående skyddsmål vara motiverat att definiera ytterligare skyddsmål. Det kan också vara aktuellt att flytta skyddsmål mellan olika skyddsklasser baserat på de specifika förhållandena.

**Tabell 1.** Exempel på skyddsmål med tillhörande skyddsklass.

Skyddsklass	Skyddsmål	Kommentar
1	Folksamling	Gräns är svårbedömd, men föreslås vara över 10 personer.
	Utrymningsväg i Vk2B eller Vk2C	Vid utrymning av stora samlingslokaler är det svårt att vända flöden
	Luftintag till Vk5B till Vk5D	Inte möjligt att utrymma personer till det fria
2	Enstaka personer (3:e person)	Det är inte möjligt att i alla lägen upprätthålla ett avstånd till personer som server eller använder en vätgasanläggning.
	Utrymningsväg från byggnad i allmänhet	Utrymmande personer kan påverkas av utsläppet
	Mycket svårutrymd byggnad (Vk5B till Vk5D)	Om byggnad börjar brinna kan det påverka boende, men byggnadens brandskydd ska hindra att flera dödsfall uppstår.
	Luftintag till byggnad i allmänhet	
3	Byggnad i allmänhet	Medför omfattande egendomsskador

Skyddsklass 1 är dels kopplat till att många personer samtidigt kan påverkas, vilket ger mycket allvarliga konsekvenser, men de har också svårare att förflytta sig från t.ex. en jetflamma på grund av andra personer i närområdet eller nedsatt rörlighet.

Skyddsklasserna används primärt för att koppla skyddsmålen till olika sannolika skadefall i nedanstående kapitel.

## 2.4 Skadekriterier per målkategori

I kapitel 2.3 definierades olika skyddsmål som är objekt i omgivningen som ska skyddas mot påverkan. Vilken påverkan ett visst skyddsmål kan motstå är dock gemensamt för flera olika skyddsmål beroende på om det till exempel avser en människa eller en byggnad. I detta kapitel används därför begreppet måltyp som är en beskrivning av vilken typ av skyddsmål som avses.

De tre måltyperna som återfinns i Tabell 2 är människor, luftintag/öppningar samt byggnader. Utöver detta finns även en måltyp som avser risk för eskalation på grund av detonation. Acceptabel påverkan på dessa återfinns i nedanstående tabell.

**Tabell 2.** Skadekriterium för olika måltyp. Understruket värde är det som ger längst avstånd och därmed blir dimensionerande för skyddsavstånd.

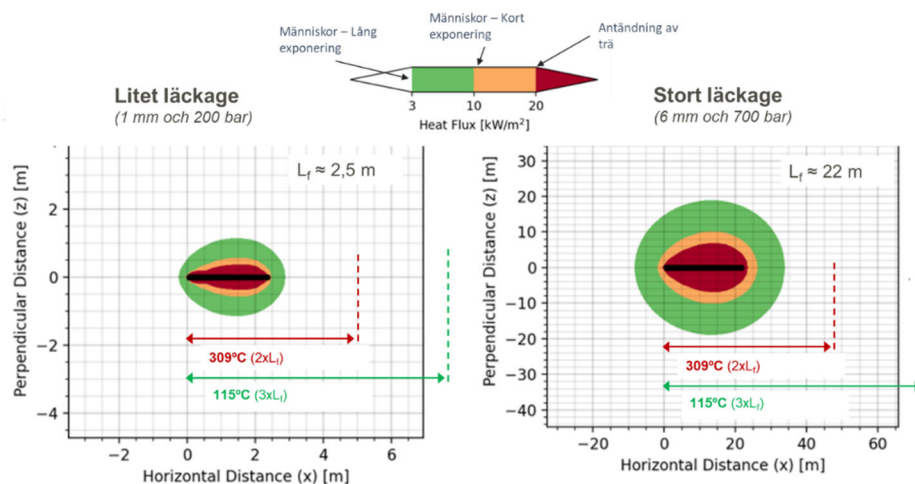
Måltyp	Vätgas-koncentration	Jetflamma	Strålning	Övertryck
<b>Människa</b>	8%	<u>115°C/309°C</u> <sup>(a)</sup>	2,5 kW/m <sup>2</sup> 10 kW/m <sup>2</sup> <sup>(a)</sup>	5 kPa
<b>Luftintag/öppning</b>	8%	-	-	-
<b>Byggnad</b>	-	<u>Flamlängd</u>	<u>15 kW/m<sup>2</sup></u>	5 kPa
<b>Mycket obstruktioner</b>	30%	-	-	-
<b>Andra gasbehållare</b>	-	<u>115°C /309°C</u> <sup>(b)</sup>	10 kW/m <sup>2</sup> / 30 kW/m <sup>2</sup>	-

<sup>(a)</sup> Det högre värdet gäller om personen snabbt kan flytta på sig och det lägre om den inte kan det.

<sup>(b)</sup> Värdet är osäkert och därmed konservativt valt, men 115°C används för behållare med låg motståndskraft och 309°C för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

Ofta används strålning som skadekriterium för **människor**, men mot bakgrund av den begränsade strålningsandelen för vätgas och den höga förbränningsstemperaturen så kommer temperaturen i förbränningsprodukterna normalt att bli dimensionerande för en vätgasjetflamma<sup>4</sup>. När det gäller temperaturer så kan det även konstateras att den varma luften kommer att vara mycket fuktig, eftersom vatten är förbränningsgasen för vätgas, och det minskar den acceptabla temperaturen (Purser & McAllister, 2016). För enstaka personer som snabbt kan förflytta sig så accepteras 309°C vilket medför tredje gradens brännskada efter 20 sekunder enligt Molkov (2012) och om en hel person utsätts för denna temperatur orsakas inkapacitering efter 10 sekunder enligt Purser och McAllister (2016). Det bör dock noteras att i verkligheten är jetflamman smal (med en radie på ca 9% av flamlängden enligt Tang et al (2018)) och temperaturen som högst bara precis i mitten. För personer som inte snabbt kan flytta sig så används 115°C vilket ger smärta efter 5 minuter enligt Molkov (2012) och enligt Purser och McAllister (2016) ger det inkapacitering efter 5 minuter. Det är även farligt att befinna sig inne i ett gasmoln som antänds. Risk för detta finns emellertid först vid en vätgaskoncentration kring 8% (se nedan) och flamlängden normalt motsvarar avståndet till 11% vid en oantänd jet (Molkov & Saffers, 2013), så kommer avståndet till ovan nämnda temperaturer (som uppnås vid dubbla respektive tredubbla flamlängden) alltid vara längre.

<sup>4</sup> Det bör dock noteras att de acceptanskriterier som normalt används är baserad på svartkroppsstrålning (värmestrålning) medan vätgasjetflammar primärt sänder ut UV-strålning. Eftersom t.ex. ögon är mycket känsliga för detta så är acceptanskriteriet sannolikt lägre, men det är mycket osannolikt att det är längre än avståndet för temperatur.



**Figur 7.** Jämförelse mellan avstånd för skadliga förhållanden gällande strålning samt temperatur där 309°C ger tredje gradens brännskada efter 20 sekunder och 115°C ger smärta efter 5 min (Molkov, 2012). Svart linje motsvarar flamlängden.

Avstånden för **luftintag/öppning** är för att hantera risken att en brännbar blandning ska uppkomma inne i byggnaden. Anledningen till att avstånd till 8% vätgaskoncentration används för icke-antända utsläpp är att det är först kring denna koncentration som flamspridning kan ske horisontellt vilket också innebär att ett jetutsläpp med lägre koncentration inte kan antändas (Molkov, 2012). Dessutom krävs koncentrationer upp mot ca 9,5% för att tryckökningen ska vara betydande (Molkov, 2012). En vätgaskoncentration på 8% kallas ibland för "Lower Hazardous Limit" (LHL). Dessutom så kommer ytterligare utblandning att ske inne i byggnaden.

När det gäller antändningsrisk för **byggnad** så används ofta ett skadekriterium baserat på strålning där nivåer på 15-20 kW/m² är vanligt förekommande. Detta är dock baserat på naturlig konvektion i luft vilket skiljer sig väsentligt från situationen vid antändning av en vätgasjetflamma. Förbränningsprodukterna kommer att träffa byggnaden med en hög hastighet och då späda ut pyrolysgaserna som bildas av strålningen. Förbränningsprodukterna kommer även ha en hög koncentration av vattenånga och på så sätt försvåra antändning. Å andra sidan är gasen varm och kan på så sätt bidra till pyrolysen vid sidan av strålningen. Det saknas forskning på hur detta sammantaget påverkar risken för antändning, men det kan konstateras utifrån Figur 4 att avståndet till 15-20 kW/m² är ungefär lika långt som flamlängden. Eftersom flaman kan förväntas antända byggnaden om den träffar fasaden så är dock den praktiska osäkerheten förhållandevis låg. Utifrån Figur 7 kan det konstateras att skillnaden mellan flamlängden och avståndet till 15 kW/m² går från ca 0% (för det lilla läckaget) till ca 10% (för det stora läckaget) vilket bedöms vara inom felmarginalen.

Område med **mycket obstruktioner** är relevant då det kan innebära att en detonation uppnås i vissa fall. Exakt när det finns risk för detta är inte känt, men



forskning visar att det primärt handlar om områden med mycket obstruktioner som bara delvis hindrar flödet (se även diskussion i kapitel 2.1). Det bedöms vara mycket osannolikt att detta skulle kunna inträffa vid koncentrationer på under 30% vätgas eftersom flamhastigheten hos vätgas är som högst mellan 30-50% (Molkov, 2012) och att antändning i koncentrationer under 30% bara ger mycket låga explosionstryck (Jallais et al., 2018).

Inom lagret ska behållare skyddas mot jetflammor i enlighet med MSBFS 2020:1, men eskalation måste även hindras genom att ett lager inte påverkar några **andra gasbehållare** i närområdet eftersom det kan orsaka ruptur. Som framgår av kapitel 3.1 och 3.2 så är kritisk strålningsnivå antingen 10 kW/m<sup>2</sup> eller 30 kW/m<sup>2</sup>. Höga temperaturer kan sannolikt också leda till ruptur på motsvarande sätt som strålning. Om den stålbehållare med hög hållfasthet med den lägsta acceptabla infallande strålningen enligt Tabell 10 (s. 27) utsätts för 309°C omgivningstemperatur med en konservativt antagen värmeöverföringskoefficient på 25 kW/m<sup>2</sup>K (Karlsson & Quintiere, 1999) så uppnår den maximalt 93°C efter 30 min. Detta understiger den temperatur vid vilken säkerhetsventilen ska lösa ut vilket är kriteriet för infallande strålning enligt kap 3.1 och således acceptabelt. Det bör också noteras att det antas att hela behållaren utsätts för 309°C medan det i verkligheten bara är lokalt precis där jeten träffar. Det finns således goda möjligheter att minska detta avstånd för specifika projekt. För behållare med låg hållfasthet, dit kompositbehållare räknas, är svårare eftersom kompositmaterialet börjar brytas ner vid 120°C (Kim et al., 2017) så ansätts maximal omgivningstemperatur konservativt till 115°C.

## 2.5 Dimensionerande skadefall per skyddsmål

Som diskuterades i kapitel 2.3 så finns det en direkt koppling mellan konsekvensens allvarighet (beskriven som skyddsklass) och hur osannolikt scenario som ska väljas för att visa att den sammantagna risken är acceptabel. Ett scenario som är vanligt förekommande får inte orsaka några allvarliga konsekvenser alls medan även ett osannolikt scenario måste hanteras så att det inte orsakar ett stort antal skadade.

Att välja dimensionerande skadefall är svårt och det finns en betydande spridning mellan olika standarder och lagstiftning på området. Nedan följer några exempel på principer i olika regler. Vanligen baseras dessa på den största förekommande rörstorlek i anläggningen, men det bör inte finnas några hinder för att man beaktar storleken på rör inom vissa områden.

**Tabell 3.** Exempel på dimensionerande skadefall i olika regelverk och standarder

Regelverk	Dimensionerande skadefall (andel av största rörets storlek)	Kommentar
<b>NPFA 2:2020</b>	3% av area	Baserat på att täcka in 99% av alla läckage på en typisk tankstation (LaChance et al., 2009)
<b>NFPA 2:2023</b>	1% av area	Sänktes för att komma närmare en tankstation baserad på QRA
<b>ISO 19880-1:2022</b>	1 mm, 10% av area eller fullt rörbrott	Bara exempel som anges i bilaga A, men troligen normsättande
<b>H<sub>2</sub>-TSA</b>	1/3 av omkretsen x 1 mm eller 0,5 mm <sup>2</sup>	Hålstorleken baserad på omkretsen kommer från äldre praxis för gasolslangar medan det lilla hålet avser representera mindre läckage kring komponenter.
<b>SEK Handbok 426 (ATEX)</b>	0,1 mm <sup>2</sup>	Mindre allvarliga fall som används för begränsning av tändkällor

I kapitel 2.3 så definieras tre skyddsklasser som ska skyddas från litet, mellan respektive stort läckage. Valet på storlekar som motsvarar dessa är i någon mån godtyckligt, men ett förslag är att basera det på nedanstående storlekar som följer ovanstående praxis.

**Tabell 4.** Förslag på tre dimensionerande hålstorlekar

Beskrivning	Storlek
<b>Litet</b>	3% av area
<b>Mellan</b>	10% av area
<b>Stort</b>	Fullt rörbrott

Det är också viktigt att notera att detta utsläpp inte är begränsat till själva behållarna utan kan inträffa varsohelst längs rören. Så länge rören är helsvetsade och skyddade mot påkörning så kan det dock vara rimligt att bortse från rörsträckor utan kopplingar (jmf. ISO 19880-1:2022 pkt 7.11.3).

En skillnad mot behållarna (eller snarare kopplingspunkten på dessa) och övriga rör är att övriga rör är möjliga att isolera genom detektion och automatiska ventiler. Hur detta påverkar det dimensionerande skadefallet diskuteras i nästkommande kapitel.

## 2.6 Påverkan av detektion och automatisk isolering

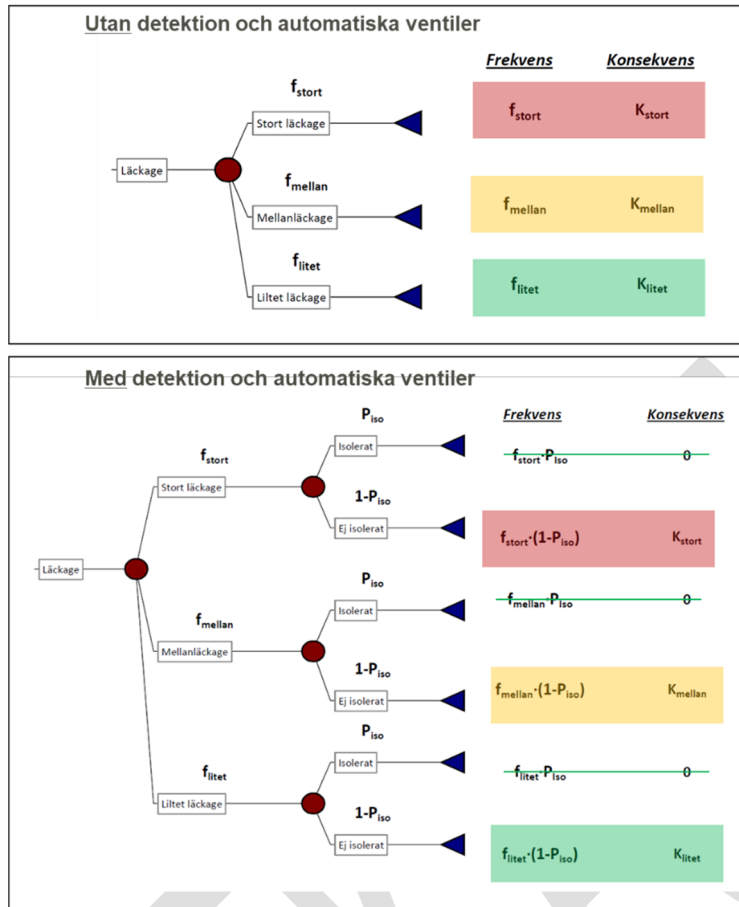
Om en anläggning förses med lämplig detektion<sup>5</sup> och automatiska ventiler så kan dessa, givet att de fungerar, minska frekvensen av långvariga utsläpp (>5-10 sekunder<sup>6</sup>). Om en enkel illustration av fallen med och utan denna form av utrustning görs med hjälp av två händelseträd så erhålls Figur 8.

Observera att denna är baserad på att skyddsålet kan motstå påverkan under tiden till utsläppet har isolerats. Det gäller sannolikt för antändning av byggnad och risken för ansamling av brännbar gas i byggnad. Det kan också förväntas göra att även människor som inte snabbt kan förflytta sig kan motstå en högre temperatur (dvs. 309°C istället för 115°C). Det kan även förväntas att isoleringen har fått effekt innan utrymning från en närliggande byggnad har påbörjats.

---

<sup>5</sup> I normala fall krävs ljuddetektion utomhus eftersom det är svårt att få jetutsläppen att nå vätgasdetektorerna och dessutom reagerar dessa bara på oantända utsläpp.

<sup>6</sup> Olika uppgifter kring detta finns, men detta motsvarar tiden att detektera, isolera och sedan att gasen inom den isolerade volymen läcker ut.



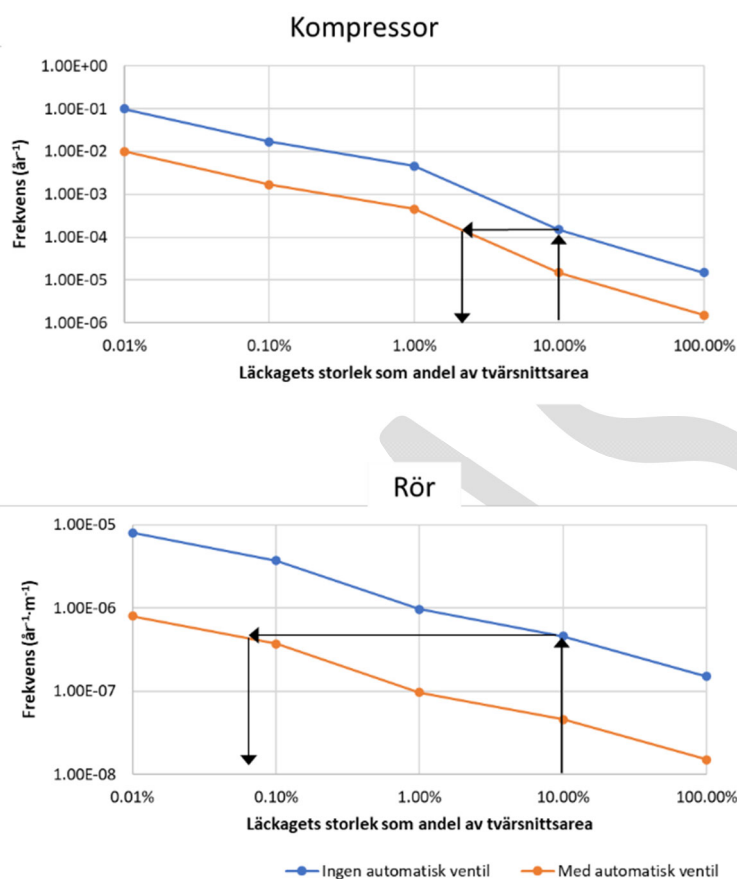
**Figur 8.** Illustration av ett händelsetråd för ett system med respektive utan detektering och automatiska ventiler baserat på att skyddsåtgärden kan motstå påverkan till isoleringen har genomförts.  $P_{iso}$  är ett tal mellan 0 och 1 som anger sannolikheten för en framgångsrik isolering av utsläppet (dvs systemet fungerar som avsett).

Målet är att systemet med detektering och isolering ska ha samma säkerhetsnivå som systemet utan detektering och isolering. Detta innebär att om ett dimensionerande skadefall med frekvensen  $f$  väljs för systemet utan detektering så ska ett dimensionerande skadefall med frekvensen  $f \cdot (1 - P_{iso})$  väljas för system med detektering. Detta innebär att systemet med detektering kan ha skyddsavstånd dimensionerande för ett mindre hål med bibehållen säkerhetsnivå.

Hur stor skillnaden i hålstorlek är mellan de två alternativen beror på funktionssannolikheten för isoleringssystemet. Om detta utförs i SIL2-klass så kan denna antas vara 90% vilket även anges som föreslaget värde av Sandia (LaChance et al., 2009). Hur stor skillnaden är beror också på vilken typ av komponent det är eftersom skillnaden i frekvens mellan stora och små läckage är olika för olika komponenter.

Om frekvenser hämtas från HyRAM som är baserat på Sandias omfattande analys av läckagefrekvenser för vätgassystem så är skillnaden i frekvens minst för rör och störst för kompressorer. Om frekvensen med respektive utan detektering och

automatiska ventiler ritas in så fås nedanstående diagram. Pilarna visar hur dimensionerande hålstorlek påverkas av den automatiska ventilen om utgångspunkten är ett hål motsvarande 10% av tvärsnittsytan (dvs mellan-fallet i kapitel 2.5) för rör respektive kompressor.



**Figur 9.** Påverkan av automatiska avstängningsventiler på dimensionerande skadefall för rör respektive kompressor.

Som framgår av ovanstående figur så minskar den automatiska isoleringen det dimensionerande skadefallet för ett rör (givet 90% tillförlitlighet) från 10% till under 0.1% medan den för kompressorer minskar från 10% till ca 3%. Metodiken i denna rapport skiljer inte på olika komponenter utan därför väljs det mest konservativa fallet vilket är för kompressorer. En positiv aspekt är också att det som tidigare var ”mellan-läckage” (10%) istället blir ”litet läckage” (3%) vilket underlättar användningen. Det samma gäller ”stort läckage” (100%) som på motsvarande sätt blir ”mellan-läckage” (10%) om motsvarande pilar ritas med utgångspunkt i 100% i ovanstående figur. Om det samma skulle göras för det minsta hålet (3%) så skulle hålet bli ca 0,1% vilket benämns ”mycket litet”.

Om detta kopplas till de dimensionerande skadefall för olika skyddsklasser som föreslogs i kapitel 2.5 så erhålls nedanstående tabell.

**Tabell 5.** Samband mellan sannolikhet och hålstorlek med beaktande av isoleringsmöjlighet

Skyddsklass	Hålstorlek <u>utan</u> isoleringsmöjlighet eller där skyddsmålet inte kan motstå påverkan under 10 s	Hålstorlek <u>med</u> isoleringsmöjlighet
<b>SK3</b> ("Skadade eller egendom")	Litet	Mycket litet (0,1%)
<b>SK2</b> ("Enstaka döda")	Mellan	Litet
<b>SK1</b> ("Flera döda")	Stort	Mellan

## 2.7 Beräkning av avstånd till olika påverkan

Beräkningar sker för tre olika tryck (350 bar, 500 bar och 1000 bar) och för en innerdiameter på 8 mm. För vägledning kring andra tryck eller inre rördiametrar så hänvisas till vägledning i kapitel 2.8.

**Tabell 6.** Antänt utsläpp: Avstånd till olika påverkan baserat på 8 mm innerdiameter

Tryck	Hålstorlek								
	Liten (3%)			Mellan (10%)			Stort (100%)		
(bar)	Flam-längd (m)	Till 309°C (m)	Till 115°C (m)	Flam-längd (m)	Till 309°C (m)	Till 115°C (m)	Flam-längd (m)	Till 309°C (m)	Till 115°C (m)
<b>350</b>	3,6	7,2	10,8	6,6	13,1	20,0	20,8	41,6	62,4
<b>500</b>	4,1	8,2	12,3	7,5	15,0	22,4	23,7	47,3	71,0
<b>1000</b>	5,1	10,2	15,3	9,3	18,6	27,9	29,4	58,7	88,1

För det mycket lilla hålet (0,1%) så är endast flamlängden relevant och denna uppgår till 0,7-0,9 m beroende på trycket.

Det är troligt att stignakten kommer att göra att plymen vänder uppåt innan den når 115°C för stora hål och kanske redan vid 309°C i vissa fall, men dessvärre saknas för närvarande beräkningsmodeller för att avgöra detta förutom att använda CFD. Om stignakten skulle beaktas så skulle flera avstånd troligen kunna kortas.

**Tabell 7.** Icke-antänt utsläpp: Avstånd baserat på 8% vätgaskoncentration för 8 mm innerdiameter

Tryck (bar)	Hålstorlek					
	Liten (3%)		Mellan (10%)		Stort (100%)	
	8% H <sub>2</sub> (m)	30% H <sub>2</sub> (m)	8% H <sub>2</sub> (m)	30% H <sub>2</sub> (m)	8% H <sub>2</sub> (m)	30% H <sub>2</sub> (m)
<b>350</b>	4,6	0,9	7,9	1,6	25,1	5,2
<b>500</b>	5,0	1,0	9,1	1,9	28,8	6,0
<b>1000</b>	6,3	1,3	11,5	2,4	36,2	7,5

Hänsyn har tagits till att stigkraften efter visst avstånd gör att det oantända utsläppet vänder uppåt baserat på Molkov (2012), men detta påverkar inte avståndet för aktuell rörstorlek ens vid 350 bar. En beräkning kan dock vara motiverad för större rör och/eller lägre tryck.

## 2.8 Sammanställning av avstånd

I detta kapitel presenteras avstånd för de skyddsmål som har identifierats.

**Tabell 8.** Dimensionerande skadefall per skyddsmål och isoleringsmöjlighet

Måltyp	Skyddsmål	Isoleringsmöjlighet	Dimensionerande skadefall <sup>2</sup>	Skadekriterium
<b>Människor</b>	Folksamling (SK1)	Ja <sup>1</sup>	Stort	309°C
		Nej	Stort	115°C
	Enstaka (SK2)	N/A	Mellan	309°C
<b>Mycket svårutrymd byggnad</b>	Byggnaden (SK2)	Ja	Litet	Flamlängd
		Nej	Mellan	Flamlängd
	Luftintag (SK1)	Ja	Mellan	8% H <sub>2</sub>
		Nej	Stort	8% H <sub>2</sub>
<b>Samlingslokal</b>	Utrymningsväg (SK1)	Ja	Mellan <sup>3</sup>	115°C
		Nej	Stort	115°C
<b>Byggnad i allmänhet</b>	Byggnaden (SK3)	Ja	Mycket litet	Flamlängd
		Nej	Litet	Flamlängd
	Luftintag (SK2)	Ja	Litet	8% H <sub>2</sub>
		Nej	Mellan	8% H <sub>2</sub>
<b>Övrigt</b>	Mycket obstruktioner	N/A	Mellan	30% H <sub>2</sub>
	Andra gasbehållare	Ja	Litet	115°C/309°C <sup>4</sup>
		Nej	Mellan	115°C/309°C <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Isolering med detektion och avstängning minskar exponeringstiden för folksamlingar där personerna inte kan förflytta sig snabbt, men tar inte helt bort påverkan. Därför behöver avståndet dimensioneras både för att isoleringen fungerar (stort hål men kort exponering) och att den inte fungerar (mellan-hål men långvarig exponering). Dock så kommer avståndet för stort hål och 309°C alltid vara längre än mellan-hål och 115°C vilket innebär att bara det längsta avståndet behöver beräknas.

<sup>2</sup> Ges av kombinationen av skyddsklass och isoleringsmöjlighet. Mycket litet hål motsvarar 0,1%, litet motsvarar 3%, mellan motsvarar 10% och stort motsvarar 100% av rörets tvärsnittsarea.

<sup>3</sup> Påverkar scenariot eftersom utrymning inte förväntats ha påbörjats innan isoleringen har genomförts.

<sup>4</sup> Den lägre temperaturen används för behållare med låg motståndskraft och den högre för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

Detta medför följande avstånd för ett rör med 8 mm innerdiameter (för andra rördimensioner se ekvationen sist i detta kapitel). Notera att **avståndet gäller från hela vätgasanläggningen förutom från helsvetsade rör.**



**Tabell 9.** Dimensionerande skadefall per skyddsmål beroende på isoleringsmöjlighet och lagringstryck. Tabellen är baserad på 8 mm innerdiameter på rör.

Måltyp	Skyddsmål	Isolerings- möjlighet	350 bar [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
<b>Människor</b>	Folksamling (SK1)	Ja	41,6	47,3	58,7
		Nej	62,4	71,0	88,1
	Enstaka (SK2)	N/A	13,1	15,0	18,6
<b>Mycket svårutrymd byggnad</b>	Byggnaden (SK2)	Ja	3,6	4,1	5,1
		Nej	6,6	7,5	9,3
	Luftintag (SK1)	Ja	7,9	9,1	11,5
		Nej	25,1	28,8	36,2
<b>Samlingslokal</b>	Utrymningsväg (SK1)	Ja	20,0	22,4	27,9
		Nej	62,4	71,0	88,1
<b>Byggnad i allmänhet</b>	Byggnaden (SK3)	Ja	0,7	0,7	0,9
		Nej	3,6	4,1	5,1
	Luftintag (SK2)	Ja	4,6	5,0	6,3
		Nej	7,9	9,1	11,5
<b>Övrigt</b>	Undvika detonation	N/A	1,6	1,9	2,4
	Andra	Ja	7,2 / 10,8	8,2 / 12,3	10,2 / 15,3
	Gasbehållare <sup>1</sup>	Nej	13,1 / 20,0	15,0 / 22,4	18,6 / 27,9

<sup>1</sup> Det längre avståndet används för behållare med låg motståndskraft och det kortare för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

Det bör noteras att avstånden i Tabell 9 kan minskas genom lämplig barriär vilket diskuteras i kapitel 4 samt att gasbehållare (men inte andra komponenter) även måste skyddas från påverkan av en brand i omgivningen vilket diskuteras i kapitel 3. Uppdelningen i olika skyddsklasser är också relativt generell och bör i vissa fall tas fram specifikt för ett projekt baserat på definitionerna i kapitel 2.3.

Anpassning av avstånden i Tabell 9 till andra innerdiametrar än 8 mm kan genomföras med nedanstående ekvation då såväl flamlängder som avstånd till specifika vätgaskoncentrationer ökar linjärt med håldiametern.

$$x_D = D \cdot \frac{x_{8 \text{ mm}}}{8}$$

Där  $x_D$  är skyddsavståndet för ett rör med en innerdiameter på D millimeter och  $x_{8 \text{ mm}}$  är avståndet för aktuellt fall hämtat från **Tabell 9**.

För andra tryck så är ingen interpolering möjlig utan istället bör närmast högre tryck i tabellen användas.

# 3 Påverkan från omgivningen på vätgaslagret

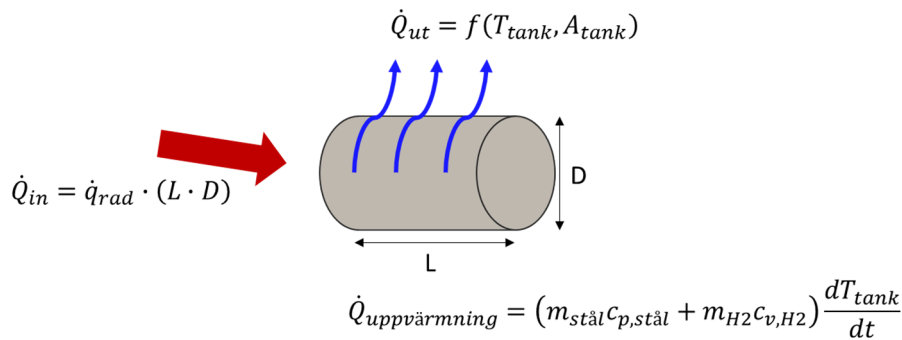
En brand i omgivningen kan i vissa fall leda till en tankruptur vilket ger mycket långa riskavstånd till följd av tryckvåg och fragment och måste därmed förhindras. Värmeöverföringen från branden sker främst genom strålning och olika typer av tryckkärl är olika känsliga för detta. Därefter görs beräkningar för avstånd från byggnader, ansamlingar av brännbart material, fordon samt skogsbrand i efterföljande kapitel.

## 3.1 Kritisk påverkan på stålbehållare

När en stålbehållare värms upp av en brand i omgivningen kommer trycket att succesivt öka och riskerar att orsaka en ruptur om trycket blir större än vad behållaren kan motstå. För att hindra detta förses stålbehållare med en säkerhetsventil som aktiveras vid ett givet tryck. Denna dimensioneras för att hindra ruptur, men vanligen används även ett säkerhetsavstånd till brännbart material i omgivningen som redundans för denna.

En stålbehållare kan ofta motstå ett väsentligt högre tryck än det normala driftrycket, men i beräkningarna i denna rapport antas det att det maximala trycket som får uppnås är provtryckningstrycket som uppgår till 1,43 gånger driftrycket. Uppvärmningen antas kunna pågå som längst under 30 minuter vilket anses motsvara tiden för räddningstjänstens insats eller att det brännbara materialet brinner färdigt. Behållarens och gasens temperatur antas vara uniform vilket är rimligt för denna typ av långsamma uppvärmning vilket gör att lokal försvagning av stålbehållaren inte behöver beaktas (eftersom temperaturen bara kommer att vara 146°C vid dimensionerande tryck enligt ovan)

Beräkningsmetoden för tryckkärl i stål är en vidareutveckling av metoden framtagen av Lackman (2017) som även beaktar den konvektiva kylningen av flaskan som sker parallellt med strålningsuppvärmningen. Metoden presenteras i bilaga A och illustreras i Figur 10.



**Figur 10.** Illustration av modell för uppvärmning av ståltankar

Principen innebär att såväl gas som själva behållaren antas ha samma temperatur,  $T_{tank}$ , som ansätts som  $20^{\circ}\text{C}$  till att börja med. Uppvärmningen sker genom att energi i form av strålningsvärme från en brand i omgivningen tillförs, men samtidigt försvinner energi från stålbehållaren genom konvektiv kylning. Skillnaden mellan dessa värmer upp tanken, men hur många grader ett visst energitillskott motsvarar bestäms av tankens termiska tröghet.

Beräkningar har genomförts för dels en standard 50 l flaska på 200 bar samt en uppsättning olika stålbehållare från leverantörer av tankstationer med nedanstående resultat.

**Tabell 10.** Kritiska strålningsnivåer för några kommersiellt tillgängliga stålbehållare

Tryck (bar)	Volym (l)	Kritisk strålningsnivå (kW/m <sup>2</sup> )
200	50	11
240	2335	29
550	433	39
	1407	41
1033,5	290	49
	485	50

Det framgår av ovanstående tabell att volymen har en mycket begränsad påverkan. Det beror dock på att diametern hålls konstant för respektive trycknivå (550 respektive 1033,5 bar) och endast längden ökas. Skulle istället förhållandet mellan längd och diameter istället bibehållas när volymen för behållaren på 550 bar ökas från 433 till 1407 liter så skulle den stora behållaren kunna motstå  $57 \text{ kW/m}^2$  istället för  $41 \text{ kW/m}^2$ .

Detta innebär att problemet är mångdimensionellt och därmed svårigen låter sig sammanfattas i en direkt användbar tabell och därför kan det finnas en fördel om kritisk strålningsnivå beräknas för varje projekt i enlighet med metoden i bilaga A. För att underlätta praktisk användning och som illustration av ungefärliga avstånd

i olika fall definieras två nivåer för stålbehållares motståndskraft i nedanstående tabell.

**Tabell 11.** Förslag på definition av två nivåer av stålbehållares motståndskraft mot infallande strålning

Motståndskraft	Definition	Kritisk strålningsnivå (kW/m <sup>2</sup> )
Hög	>2000 liter <i>eller</i> >500 bar	30
Låg	Övriga behållare <sup>1</sup>	10

<sup>1</sup> Även kompositbehållare faller under denna kategori enl. kap 3.2.

För att underlätta beräkning av motståndskraften för ett enskilt projekt i enlighet med bilaga A så finns ett excelblad för beräkning tillgänglig på MSB:s hemsida<sup>7</sup>.

## 3.2 Kompositbehållare

För kompositbehållare så finns det begränsad information tillgänglig för de låga strålningsnivåer som är aktuella när tryckkärnen ska motstå 30 minuters påverkan. Försök gjorda inom FireComp-projektet (Hidalgo et al., 2015) tyder på att materialet är opåverkat vid 10 kW/m<sup>2</sup>, men påverkas vid 15 kW/m<sup>2</sup>. Därför används, i väntan på mer exakt information, ett kritiskt värde på 10 kW/m<sup>2</sup>. En fördel med detta val är också att kompositbehållare får samma kritiska strålningsnivå som behållare i stål med låg motståndskraft enligt föregående kapitel vilket minskar antalet avstånd som behöver hanteras.

## 3.3 Påverkan från brand i byggnad

Beräkning av strålning från byggnadsbränder genomförs regelbundet av brandkonsulter för att beräkna erforderligt avstånd mellan byggnader och modeller för detta har funnits under en längre tid. Lämpliga indata att användas presenteras i BBRAD3 (BFS 2013:12) punkt 5.2.1 och ska antas vara 84 kW/m<sup>2</sup> över fönstrets area för bostäder, kontor, samlingslokaler och öppna parkeringshus och 168 kW/m<sup>2</sup> för affärer, industrier och lager.

Detta är baserat på att fasaden är obrännbar. Om fasaden är brännbar så blir flammorna längre, men optiskt tunna så att de bidrar mindre till strålningen. I beräkningarna antas, konservativt, att strålningen blir lika stort som om fönstret hade varit dubbelt så högt.

Typbyggnaden som används i beräkningarna har åtta fönster på 1,5x1,5 meter vardera placerade precis bredvid varandra. Gaslagret är placerat mitt framför byggnaden på halva fönstrets höjd (vilket ger den högsta infallande strålningen).

<sup>7</sup> Länk läggs in här i samband med att rapporten publiceras

Specifika projekt kan genomföra egna beräkningar baserat på närliggande byggnaders faktiska utseende.

Detta medför följande avstånd baserat på de kritiska strålningsnivåerna i kapitel 3.1 och 3.2.

**Tabell 12.** Skyddsavstånd mot påverkan av brand i byggnad.

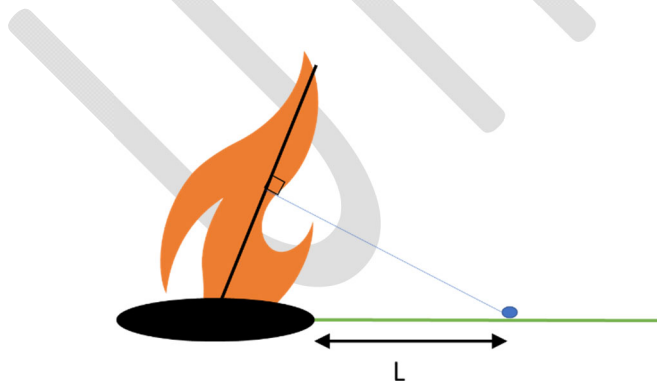
Behållarens motståndskraft <sup>1</sup>	Kritisk strålning [kW/m <sup>2</sup> ]	Industribyggnad och motsv.		Kontor och motsv.	
		Obrännbar fasad	Brännbar fasad	Obrännbar fasad	Brännbar fasad
<b>Hög</b>	30	4 m	7 m	2 m	4 m
<b>Låg</b>	10	9 m	13 m	6 m	9 m

<sup>1</sup> Hög=stålbehållare >2000 l eller >500 bar, Låg=komposit samt övriga stålbehållare

### 3.4 Påverkan från ansamling av brännbart material

Strålningen från en ansamling av brännbart material (eller invallning för brännbar vätska) kommer att bero på storleken på ansamlingen och effektutvecklingen per kvadratmeter. Flammhöjden i sin tur kan beräknas baserat på effektutvecklingen per golvyta av det som lagras och storleken på lagret. I beräkningarna antas det att effektutvecklingen är konstant under de 30 minuter under vilken påverkan fortgår, vilket är ett mycket konservativt antagande.

Flamman antas luta på grund av vind så att den infallande strålningen maximeras. Infallande värmestrålning har beräknats med Modak's formel (Modak, 1977). En strålningsandel på 30% antas i beräkningarna.



**Figur 11.** Strålning från vindpåverkad flamma.

Baserat på detta så erhålls avstånden i nedanstående tabell.

**Tabell 13.** Skyddsavstånd mellan ansamling av brännbart material och behållare med låg motståndskraft (10 kW/m<sup>2</sup>).

		Effektutveckling per golvyta (kW/m <sup>2</sup> )				
		1500	2000	2500	3000	3500
Upplagets	10 m <sup>2</sup>	5 m	6 m	7 m	7 m	8 m
Area	20 m <sup>2</sup>	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m
	30 m <sup>2</sup>	8 m	10 m	11 m	12 m	14 m
	40 m <sup>2</sup>	9 m	11 m	13 m	14 m	19 m
	50 m <sup>2</sup>	10 m	12 m	14 m	19 m	19 m

**Tabell 14.** Skyddsavstånd mellan ansamling av brännbart material och behållare med hög motståndskraft (30 kW/m<sup>2</sup>).

		Effektutveckling per golvyta (kW/m <sup>2</sup> )				
		1500	2000	2500	3000	3500
Upplagets	10 m <sup>2</sup>	3 m	3 m	3 m	4 m	4 m
Area	20 m <sup>2</sup>	3 m	4 m	5 m	5 m	6 m
	30 m <sup>2</sup>	4 m	5 m	5 m	6 m	7 m
	40 m <sup>2</sup>	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
	50 m <sup>2</sup>	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m

Beräkningen är baserad på att upplaget är ungefär kvadratisk eller cirkulärt. Om det är avlångt så kan kvadraten på sidan som är riktad mot tryckkärnen användas. Det innebär att ett upplag som är 3x7 meter där sidan mot lagret är 3 meter får en ekvivalent area som är 9 m<sup>2</sup> (3x3) och därmed kan avstånden för 10 m<sup>2</sup> användas även om den verkliga arean är 21 m<sup>2</sup>. Om den istället är placerad på långsidan så används (konservativt) värdena för en area på 50 m<sup>2</sup> (då 7x7 är 49 m<sup>2</sup>).

För att kunna använda tabellen så behöver en effektutveckling per golvyta uppskattas. En bedömning kan baseras på nedanstående tabell eller andra vedertagna källor.

**Tabell 15.** Exempel på effektutveckling per kvadratmeter för olika material.

Material	Lagringshöjd	Effektutveckling per golvyta (kW/m <sup>2</sup> )
Fyllda säckar med post	1,52 m	400
Bensin	N/A	3290
Diesel	N/A	1985
Stoppade möbler	N/A	2500
Tomma kartonger	4,5 m	1700
Kartonger med PE-flaskor	4,5 m	1985
Träpallar	0,45 m	1420
Träpallar	1,50 m	3970
Träpallar	3,0 m	6800

Källa: Karlsson och Quintiere (1999)

Som framgår ovan så ger staplade träpallar mycket hög effektutveckling per kvadratmeter vilket beror på att det finns mycket goda möjligheter för luften att ta sig in i materialet och brinna där. Det gör att beräkningsmodellen som använts i detta kapitel, som baseras på en pölbrand eller liknande, sannolikt överskattar flammhöjden och därför bör kolumnen för 3500 kW/m<sup>2</sup> även kunna anses täcka in högre lagring med träpallar.

### 3.5 Fordon

Avstånd till parkerade personbilar har beräknats med metod framtagen av Abrahamsson (2020). Strålningen från fallstudien i denna rapport används eftersom den förefaller vara representativ för en personbil. Med ovanstående kritiska strålningsnivåer (10 kW/m<sup>2</sup> resp. 30 kW/m<sup>2</sup>) så innebär det att avstånd på 3 m respektive 2 meter behövs. Metoden tar hänsyn till vindpåverkan.

För lastbilar används en analogi till stor mängd lagrat material enligt kapitel 3.4. En trailer har typiskt en invändig storlek på 14x2,55x2,72 m (LxBxH) vilket ger en golvarea på 35,7 m<sup>2</sup>. Om möbler och kartonger med PE-flaskor bedöms vara dimensionerande så kan en effektutveckling per kvadratmeter uppskattas till maximalt 2500 kW/m<sup>2</sup>. Detta ger med samma kritiska strålningsnivåer som tidigare avstånd på 12 respektive 6 meter. Eftersom uppställningsplatser för bussar antas kunna användas av lastbilar så används samma dimensionerande avstånd.

**Tabell 16.** Skyddsavstånd mot påverkan av brand i byggnad.

Behållarens motståndskraft <sup>1</sup>	Kritisk strålning [kW/m <sup>2</sup> ]	Personbil	Lastbil
Hög	30	2 m	6 m
Låg	10	3 m	12 m

### 3.6 Skogsbrand

En skogsbrand skulle kunna påverka lagret genom strålning på motsvarande sätt som en byggnad eller ansamling av brännbart material. Det finns mycket forskning inom området (som normalt kallas Wildland-Urban Interface, WUI) och en av de mest aktiva aktörerna inom området är National Research Council (NRC) i Kanada. NRC har nyligen tagit fram en metod för att fastställa krav för att hindra att en skogsbrand sprider sig till en byggnad (Bénichou et al., 2021) och den appliceras även i detta fall.

Metoden är mycket sofistikerad, men för att slippa ta hänsyn till typen av vegetation i varje enskilt fall så används här ett förenklat angreppssätt. Om det i ett

enskilt projekt är svårt att uppnå avstånden i detta kapitel eller att förutsättningarna avviker från de som beskrivs nedan så kan en mer nyanserad analys utifrån NRC-metoden genomföras.

I första steget ska typen av bränsle fastställas. Det finns fyra olika klasser från F0 till F3 som beskrivs i tabell 2 i NRC-rapporten. En vanligt förekommande vegetation i Sverige är den som kallas typ F2 som består av över 25% barrträd (lövträd är mindre farliga) och maximalt 20% stående döda träd. Denna kan sedan kopplas till en exponeringsnivå i tabell 3 i NRC-rapporten. Denna blir då ”moderate” för vegetationsklass F2.

Ovanstående ger strålningsexponeringen, men det behövs även ett mått på gasbehållarnas motståndskraft. Detta beskrivs som ”Construction Class” från CC1 till CC3. Dessa kopplas primärt till olika byggprodukter, men det går i bilaga I i NRC-rapporten utläsa att CC3-delar (den sämsta klassen) klarar en strålning på maximalt 12,5 kW/m<sup>2</sup> och CC2 kan motstå upp till 25 kW/m<sup>2</sup>. Detta ligger i nivå med den acceptabla strålningen mot tryckkärl med låg respektive hög motståndskraft i kapitel 3.1 och är därmed lämplig som beskrivning av tryckkärlen i NRC-metoden.

Kopplingen mellan exponeringen och beständigheten återfinns i tabell 7 i NRC-rapporten där det framgår att CC3-material (behållarna med låg motståndskraft) inte får finnas i ”Priority Zone” 1A och 1. För CC2-material (behållarna med hög motståndskraft) så får dessa inte finnas i 1A. Ett avstånd fås slutligen i figur 10 i NRC-rapporten som anger att zon 1 går 10 meter ut från byggnaden och zon 1A till 1,5 meter.

Sammantaget gör detta att ett lämpligt avstånd från skog eller liknande till tryckkärlen med hänsyn till uppvärmning är enligt nedan.

**Tabell 17.** Skyddsavstånd mot påverkan av skogsbrand.

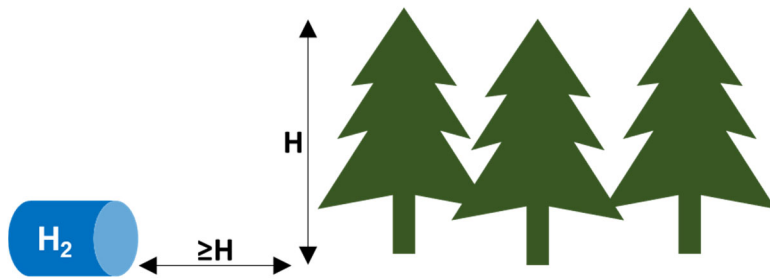
Behållarens Motståndskraft <sup>1</sup>	Beräknad kritisk strålning [kW/m <sup>2</sup> ]	Applicerad kritisk strålning enligt NRC-metoden [kW/m <sup>2</sup> ]	Minsta avstånd mellan behållare och skog eller liknande <sup>2</sup>
Hög	30	25	1,5 m
Låg	10	12,5	10 m

<sup>1</sup> Hög=stålbehållare >2000 l eller >500 bar, Låg=composit samt övriga stålbehållare

<sup>2</sup> Observera att lagret även behöver skyddas mot nedfallande träd så avståndet får inte vara kortare än höjden av det högsta trädet.

För att hindra att träd faller ner på gasanläggningen så ska dock även nedanstående avstånd upprätthållas till samtliga komponenter på vätgasanläggningen. Hänsyn ska tas till normal maximal höjd för aktuellt träslag.





**Figur 12.** Hela vätgasanläggningen (inkl rör) måste skyddas från nedfallande föremål som t.ex. träd.

### 3.7 Övrigt

Förutom avstånden ovan så behöver alla rör och komponenter skyddas från nedfallande objekt i omgivningen (jmf Figur 12), påkörning av fordon och elektrostatisk uppladdning från spänningsförande ledare över 12,0 kV enligt nedan. Rekommenderade avstånd framgår av nedanstående tabeller.

**Tabell 18.** Skyddsavstånd mot väg. Även VGU 2020 kan användas.

Högsta tillåtna hastighet	Avstånd mellan vätgasanläggning och väg
≤ 60 km/tim	10 m
80 km/tim	15 m
100 km/tim	20 m
≥ 110 km/tim	25 m

Källa: H<sub>2</sub>-TSA

**Tabell 19.** Skyddsavstånd mot spänningsförande ledare.

Konstruktionsspänning	Avstånd mellan ATEX-klassat område och elektrisk ledare
12,0-72,5 kV	15 m
82,5-170 kV	30 m
245 kV	45 m
420 kV	60 m

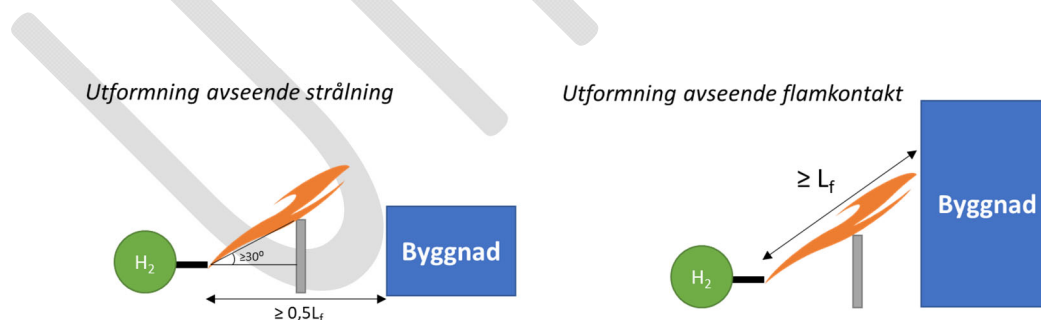
Källa: ELSÄK-FS 2022:1

## 4 Påverkan av murar och andra avskiljningar

Murar och andra barriärer kan användas för att minska avstånden både för antända och icke antända utsläpp. I detta kapitel diskuteras hur mycket avstånden kan minskas, hur stora de ska vara och vilken motståndskraft som de behöver ha.

### 4.1 Skydd mot påverkan från anläggning till omgivning

LaChance et al. (2010) har visat att skyddsavståndet avseende strålning från en jetflamma bakom en barriär ungefär halveras när flammans vinkel är  $30^\circ$  relativt marknivå. Eftersom skyddsavståndet avseende flamlängd och kritisk strålning för en byggnad är ungefär lika långa (se Figur 7) kan avståndet för flamlängd användas även i detta fall. Detta gäller oavsett byggnadshöjd<sup>8</sup>. Utöver detta behöver avståndet längs en linje från utsläppskällan till närmsta punkt på byggnaden vara så lång att den minst motsvarar flamlängden (som är det avstånd mellan utsläppskälla och byggnad som normalt krävs). Det kan noteras att eftersom  $\cos(30^\circ)$  är 0,87 så går det inte att i förväg avgöra vilken av dessa som är dimensionerande utan det beror på byggnadens höjd. De två kraven illustreras nedan.



Figur 13. Barriärens minsta höjd och dess påverkan på avstånd till byggnad.

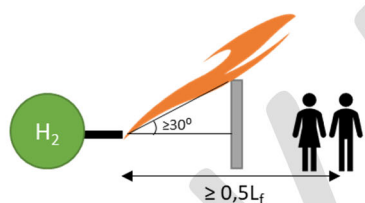
En barriär kan därmed som mest leda till en halvering av avståndet<sup>9</sup> för antända utsläpp mot byggnad. När det gäller motsvarande situation mot människor kan det noteras från Figur 7 att avstånden till  $10 \text{ kW/m}^2$  (gränsvärde för kortvarig

<sup>8</sup> Det går att ta hänsyn till byggnadshöjd genom detaljerade beräkningar, men det är för mångdimensionellt för innevarande rapport. För mer information kring detta hänvisas till LaChance et al. (2010)

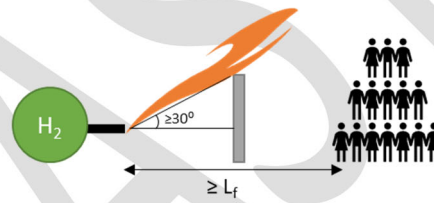
<sup>9</sup> En större minskning hade kunnat tillåtas om vinkeln hade ökat ytterligare, men det har inte behandlats av LaChance et al. (2010) och ligger utanför denna rapport.

påverkan enligt BBRAD) är ungefär motsvarande flamlängden. Därmed kan, i analogi med ovanstående, ett avstånd på ner till halva flamlängden accepteras givet att vinkeln relativt marken är minst  $30^\circ$  givet att personerna kan flytta på sig (dvs situationen med enskilda personer). När det gäller folksamlingar och liknande situationer så har, som beskrivits i kapitel 2.4, personerna mindre möjligheter att förflytta sig vilket innebär att de sannolikt bara bör få utsättas för  $2,5 \text{ kW/m}^2$  enligt BBRAD. Denna strålningsnivå uppnås på ca 1,5 gånger flamlängden för det stora hålet i Figur 7 (som normalt är dimensionerande för denna grupp), men kan bli ännu större för rör över 8 mm. Om detta avrundas (konservativt) till dubbla flamlängden innebär det att en barriär utförd för  $30^\circ$  enligt LaChance (2010) gör att det horisontella avståndet ska motsvara flamlängden. Flamlängden för olika situationer kan återfinnas i raden avseende skyddsavstånd mot byggnader för olika läckagestorlekar. Därmed kan påverkan på avståndet för människor illustreras enligt nedan.

*Utformning för påverkan på enskilda människor*



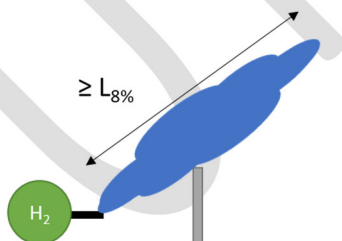
*Utformning för påverkan på folksamling*



**Figur 14.** Barriärens minsta höjd och dess påverkan på avstånd till människor.

Slutligen återfinns situationen för oantända utsläpp och för den är naturligtvis inte strålning relevant utan avståndet dimensioneras så att jetutsläppet får minst det acceptabla avståndet till skyddsmalet.

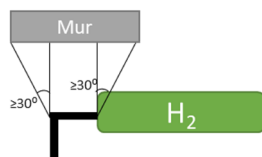
*Utformning avseende icke antända utsläpp*



**Figur 15.** Barriärens minsta höjd och dess påverkan på avstånd för icke antända utsläpp.

Kraven ovan ger inte bara barriärens höjd utan även dess bredd dimensioneras på samma sätt, se Figur 16.

Byggnad



Figur 16. Illustration av barriärens minsta bredd.

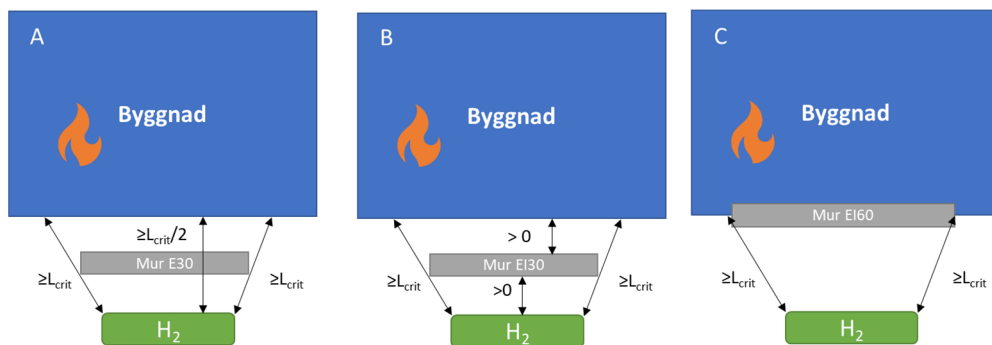
Notera också att det i många fall inte är lämpligt att göra barriären bredare eller högre än nödvändigt eftersom det ökar risken för instängning av gas.

## 4.2 Skydd mot påverkan från omgivning mot anläggning

I detta fall är det, i motsats till kapitel 4.1, bara påverkan på själva behållarna som är relevant och dessutom är påverkan mer känd eftersom den består av strålning från en brand i omgivningen mot behållarna. Värmestrålningen från en närliggande brand antas inte kunna påverka rör eller komponenter så länge de inte blir direkt brandutsatta, men det behöver värderas i varje enskilt projekt.

En barriär som motstår brandpåverkan (vilket verifieras med E-klass) kommer även utan isolerande klass (I-klass) minska strålningen. Exakt hur mycket beror på den exakta utformningen, men en konservativ uppskattning är att strålningen halveras eftersom ytan som avger strålning (båda sidor av barriären) är dubbelt så stor som den som mottar strålning (sidan riktad mot byggnad). Detta översätts grovt till en halvering av avståndet vilket är konservativt.

För en mur med isolerande förmåga (dvs I-klass) så kommer temperaturen på motsatt sida maximalt vara 160°C vid en påverkan enligt ISO-branden. Vid denna temperatur är strålningen försumbar och därmed krävs inget avstånd. Notera dock att beroende på räddningstjänstens möjligheter att kyla lagret så ska barriären vara utförd i klass EI30 eller EI60 (se kapitel 4.3)



**Figur 17.** Brandteknisk klass, minsta avstånd och storlek på avskiljning för skydd av spridning från byggnad till lager.  $L_{crit}$  är flamlängden enl. kap 2.

Motsvarande gäller även för bestämning av höjden på avskiljningen, men för brännbart material ska tas hänsyn till att flammor kan nå upp till 5 meter ovanför det brännbara materialet.

### 4.3 Behov av motståndskraft

Alla barriärer oavsett om de är avsedda för antända eller icke antända utsläpp behöver kunna motstå tryckpåverkan på barriären vid fördröjd antändning. Enligt en analys utförd av LaChance et al. (2010) så uppgår denna till ca 5-10 kPa vid simuleringar av ett läckage på 3,28 mm med ett vätgasstryck på 208-1035 bar. Dessa skapar enligt författarna bara små skador på normala barriärmaterial vilket delvis stöds av Johansson et al. (2012) även om det förefaller finnas barriärmaterial (t.ex. plåtkassetter) som bara klarar kring 5 kPa. Det bör därför tas fram en vägledning för hur barriärmaterial kan utföras. Tills vidare kan det dock antas att barriärmaterial som är stabilt fastsatta, liknande en byggnadskonstruktion, kan motstå denna påverkan.

För att hindra spridning av icke-antänd gas, vilket är relevant för luftintag och område med obstruktioner, så krävs ingen speciell klassning av barriären utan det räcker med att den är rimligt tät.

När det gäller barriärer för antända utsläpp finns det begränsat underlag att basera en sådan rekommendation på och därför bör ytterligare studier kring detta genomföras. Ett första val är mellan E-klass eller EI-klass där den första tillåter en uppvärmning på motsatt sida väggen, men utan sticklågor. Motsatt sida kommer då att stråla mot målet, men med en betydligt lägre strålningsintensitet. I ovanstående fall så var värsta fallet där jetflamman lutade så att den precis nådde över kanten på barriären. Detta bedöms ge större strålning än vad en jet rakt mot en E-klassad barriär hade kunnat ge och därför bedöms en barriär med E-klass vara tillräcklig för påverkan från jetflamman.

Tidsklassen är svårbedömd eftersom tiden i klassificeringen är baserad på en påverkan enligt ISO 834 som inte liknar temperaturhistoriken hos en vätgasjetflamma som direkt får en mycket hög temperatur. Vanligen är dock

varaktigheten hos en vätagasjetflamma förhållandevis kort (i alla fall vid stora läckage och små lagrade mängder) och det ska enligt MSBFS 2020:1 finnas möjlighet att manuellt stänga av flödet. Därför anses 60 minuters beständighet enligt ISO 834 i normalfallet vara tillräcklig. När det gäller spridning från byggnad till lager så bedöms 30 minuter räcka eftersom skyddet är dimensionerat för att hindra påverkan innan räddningstjänstens ankomst. En sådan avskiljning bedöms också i de allra flesta fall hindra påverkan även utan hjälp från räddningstjänsten om gaslagrets tömningstid är begränsad. Detta gäller inte om det helt saknas skyddsavstånd utan då krävs EI60 eftersom det då inte är möjligt för räddningstjänsten att kyla lagret.

## 4.4 Sammanställning avseende barriärer

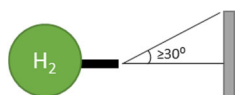
För att underlätta användningen så sammanfattas ovanstående i nedanstående tabell.

**Tabell 20.** Avskiljningars påverkan på skyddsavstånd.

Riktning	Klass	Avstånd
Från byggnad (eller annan närliggande brand) ... mot lager	E30	Halveras <sup>(a)</sup>
	EI30	Inget avstånd <sup>(a)</sup> , men dock ej sammanbyggda
	EI60	Muren kan vara sammanbyggd med byggnaden <sup>(b)</sup>
Från lager ...	Ingen klass	Avståndet mäts längs siktlinjen från komponenten till luftintag/obstruktion
	E60 <sup>(a,b)</sup>	Avståndet halveras, men får inte understiga flammans längd mätt längs siktlinjen
	E30 <sup>(b)</sup>	Halva flamlängden
	E60 <sup>(b)</sup>	Flamlängden
	E60 <sup>(b)</sup>	Halva flamlängden

<sup>(a)</sup> Barriären måste dessutom vara så stor att siktlinjen från behållaren till det brännbara materialet är längre än det ursprungliga skyddsavståndet. För brännbart material ska siktlinjen räknas till 5 meter över där det brännbara materialet slutar. Se Figur 13.

<sup>(b)</sup> Barriär ha en höjd och bredd så att vinkeln blir minst 30° relativt mark enligt Figur 18.



**Figur 18.** Illustration av kravet på minst 30 graders vinkel från aktuell komponent,

Det bör vanligtvis undvikas att göra murarna högre än nödvändigt eftersom det ökar mängden instängd gas vilket kan öka konsekvenserna vid fördröjd antändning.

UTKAST

# 5 Sammanställning för förenklad och analytisk dimensionering av avstånd

## 5.1 Påverkan från vätgasanläggningen på omgivningen

**Tabell 21.** Dimensionerande skadefall per skyddsmål beroende på isoleringsmöjlighet och lagringstryck. Tabellen är baserad på 8 mm innerdiameter på rör.

Måltyp	Skyddsmål	Isolerings- möjlighet	350 bar [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
<b>Människor</b>	Folksamling (SK1)	Ja	41,6	47,3	58,7
		Nej	62,4	71,0	88,1
	Enstaka (SK2)	N/A	13,1	15,0	18,6
<b>Mycket svårutrymd byggnad</b>	Byggnaden (SK2)	Ja	3,6	4,1	5,1
		Nej	6,6	7,5	9,3
	Luftintag (SK1)	Ja	7,9	9,1	11,5
		Nej	25,1	28,8	36,2
<b>Samlingslokal</b>	Utrymningsväg (SK1)	Ja	20,0	22,4	27,9
		Nej	62,4	71,0	88,1
<b>Byggnad i allmänhet</b>	Byggnaden (SK3)	Ja	0,7	0,7	0,9
		Nej	3,6	4,1	5,1
	Luftintag (SK2)	Ja	4,6	5,0	6,3
		Nej	7,9	9,1	11,5
<b>Övrigt</b>	Undvika detonation	N/A	1,6	1,9	2,4
	Andra	Ja	7,2 / 10,8	8,2 / 12,3	10,2 / 15,3
	Gasbehållare <sup>1</sup>	Nej	13,1 / 20,0	15,0 / 22,4	18,6 / 27,9

<sup>1</sup> Det längre avståndet används för behållare med låg motståndskraft och det kortare för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

För andra rörstorlekar än 8 mm så används nedanstående formel



$$x_D = D \cdot \frac{x_{8 \text{ mm}}}{8}$$

Där  $x_D$  är skyddsavståndet för ett rör med en innerdiameter på D millimeter och  $x_{8 \text{ mm}}$  är avståndet för aktuellt fall hämtat från ovanstående tabell.

Observera att vid samlokalisering med andra drivmedel så behöver avstånden i t.ex. TSA2020 (metan), LNGA samt MSBs handbok för drivmedelsstationer uppnås.

**Tabell 22.** Skyddsavstånd vid en inre rördiameter på 8 mm, per skyddsmål beroende på isoleringsmöjlighet och lagringstryck, med hänsyn till barriärer.

Måltyp	Skyddsmål	Klass	Isolerings- möjlighet	350 bar [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
<b>Människor</b>	Folksamling (SK1)	E60	Ja	6,6	7,5	9,3
			Nej	20,8	23,7	29,4
	Enstaka (SK2)	E30	N/A	3,3	3,8	4,7
<b>Mycket svårutrymd byggnad</b>	Byggnaden (SK2)	E60 <sup>1</sup>	Ja	3,1	3,6	4,4
			Nej	5,7	6,5	8,1
	Luftintag/öppning (SK1)	Ingen <sup>2</sup>	Ja	6,8	7,9	10,0
			Nej	21,7	24,9	31,4
<b>Samlingslokal</b>	Utrymningsväg (SK1)	E60	Ja	6,6	7,5	9,1
			Nej	20,8	23,7	29,4
<b>Byggnad i allmänhet</b>	Byggnaden (SK3)	E60 <sup>1</sup>	Ja	0,0	0,0	0,0
			Nej	3,1	3,6	4,4
	Luftintag (SK2)	Ingen <sup>2</sup>	Ja	4,0	4,3	5,5
			Nej	6,8	7,9	10,0
<b>Övrigt</b>	Undvika detonation	Ingen	N/A	1,4	1,6	2,1
	Andra gasbehållare <sup>3</sup>	E60	Ja	1,8	2,1	2,6
			Nej	3,3	3,8	4,7

<sup>1</sup> Byggnaden antas vara så hög att den träffas av jetflamman över barriären (se kap 4.1)

<sup>2</sup> Luftintaget antas vara placerat att den träffas av utsläppet över barriären (se kap 4.1)

<sup>3</sup> Eftersom avståndet mellan 10 kW/m<sup>2</sup> och 30 kW/m<sup>2</sup> är litet enligt Figur 7 så påverkar inte behållarens motståndskraft vid användning av barriär.

Vid egna beräkningar så kan nedanstående scenarier och skadekriterium användas.

**Tabell 23.** Dimensionerande skadefall per skyddsmål och isoleringsmöjlighet

Måltyp	Skyddsmål	Isoleringsmöjlighet	Dimensionerande skadefall <sup>1</sup>	Skadekriterium
<b>Människor</b>	Folksamling (SK1)	Ja	Stort	309°C
		Nej	Stort	115°C
	Enstaka (SK2)	N/A	Mellan	309°C
<b>Mycket svårutrymd byggnad</b>	Byggnaden (SK2)	Ja	Litet	Flamlängd
		Nej	Mellan	Flamlängd
	Luftintag (SK1)	Ja	Mellan	8% H <sub>2</sub>
		Nej	Stort	8% H <sub>2</sub>
<b>Samlingslokal</b>	Utrymningsväg (SK1)	Ja	Mellan	115°C
		Nej	Stort	115°C
<b>Byggnad i allmänhet</b>	Byggnaden (SK3)	Ja	Mycket litet	Flamlängd
		Nej	Litet	Flamlängd
	Luftintag (SK2)	Ja	Litet	8% H <sub>2</sub>
		Nej	Mellan	8% H <sub>2</sub>
<b>Övrigt</b>	Mycket obstruktioner	N/A	Mellan	30% H <sub>2</sub>
	Andra gasbehållare	Ja	Litet	115°C/309°C <sup>2</sup>
		Nej	Mellan	115°C/309°C <sup>2</sup>

<sup>1</sup> "Mycket litet" motsvarar 0,1% av tvärsnittsarean, "litet" motsvarar 3%, "mellan" motsvarar 10% och "stort" motsvarar 100% av ledningens tvärsnittsarea.

<sup>2</sup> Den lägre temperaturen används för behållare med låg motståndskraft och den högre för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

## 5.2 Påverkan från omgivningen på vätgasanläggningen

I Tabell 24 återfinns en förenklad form av tabellerna i kapitel 3 för att underlätta användning. I specifika projekt kan de mer detaljerade tabellerna användas med bibehållen säkerhetsnivå.

**Tabell 24.** Sammanställning med skyddsavstånd för skydd av vätgasbehållare från händelser i närområdet.

Exponering	Behållarens motståndskraft	
	Låg	Hög
<b>Stor mängd brännbart material<sup>1</sup></b>	10 m	5 m
<b>Industribyggnad och motsv.</b> Obrännbar fasad	9 m	4 m
<b>Industribyggnad och motsv.</b> Brännbar fasad	13 m	7 m
<b>Kontor och motsv.</b> Obrännbar fasad	6 m	2 m
<b>Kontor och motsv.</b> Brännbar fasad	9 m	4 m
<b>Uppställd personbil</b>	3 m	2 m
<b>Uppställd lastbil</b>	12 m	6 m
<b>Skog<sup>2</sup></b>	10 m	1,5 m
<b>Kraftledning<sup>3</sup></b>	15-60 m	15-60 m
<b>Väg<sup>4</sup></b>	10-25 m	10-25 m

<sup>1</sup> Baserat på 2500 kW/m<sup>2</sup> och 25 m<sup>2</sup> enl. kap 3.4

<sup>2</sup> Observera att avstånden måste vara så stora att träden inte kan falla ner på behållaren

<sup>3</sup> Beroende på konstruktionsspänning se kap 3.7

<sup>4</sup> Beroende på hastighet se kap 3.7

Observera att avståndet mäts från riskkällan till närmsta punkt på vätgasbehållaren i motsats till avstånden från vätgasanläggningen och ut i kapitel 5.1 där vätgasbehållaren inte är relevant utan endast kopplingspunkterna på vätgasanläggningen.

## 6 Slutsatser

Avsikten med denna rapport är att den ska kunna utgöra ett underlag för att fastställa nödvändigt skyddsavstånd vid etablering av vätgasanläggningar. Det bör dock noteras att rapporten i sig inte har någon juridisk status utan den kan användas först när dess antaganden och bedömningar accepteras av relevanta kravställare.

Så långt som har varit möjligt så har avstånden baserats på forskningsresultat gällande vätgassäkerhet, men som alla analyser krävs bedömningar och antaganden. I denna rapport handlar det främst om beslutet att utgå från tre hålstorlekar (3%, 10% respektive 100% av det aktuella rörets tvärsnittsarea) och koppla dessa mot tre konsekvensnivåer kallade skyddsklasser (SK). Dessa skyddsklasser innebär endast egendomsskada (motsvarande 3%-hållet), enstaka dödsfall (motsvarande 10%-hållet) och flera dödsfall (100%-hållet). Det bör noteras att 3% ligger i nivå med samtliga konsekvensnivåer i NFPA2 och att 100% idag inte används som dimensionerande skadefall i något regelverk. Genom att differentiera hålstorlekarna så har det varit möjligt att ta hänsyn till detta mycket utmanande fall i situationer där det kan få katastrofala konsekvenser.

Förhoppningen är att rapporten ska accepteras av kravställare och att säkerhetsnivån på så sätt kan bli mer jämn mellan olika anläggningar. Målet är även att erfoderliga avstånd ska bli tydliga för aktörer som vill etablera vätgasanläggningar och minska tiden för tillståndsärenden för att på så sätt inte hindra den nödvändiga gröna omställningen.

## 7 Förslag till vidare studier

Utöver att följa upp hur resultaten i denna rapport (eventuellt) används och tolkas i olika projekt så finns det ett flertal angelägna forskningsstudier. Några som bedöms som mest angelägna beskriv kort nedan.

- Vilka tryck genereras vid fördröjd antändning av en blockerad eller obstruerad jet?
- Under vilka förhållanden kan en vätgasjetflamma antända en byggnad eller annat brännbart material?
- Hur påverkar fysiska barriärer skyddsavstånden i olika fall?
- Hur känsliga är människor (och då främst ögonen) för strålning från en vätgasjetflamma som primärt är i UV-spektrat?
- Vilken strålningsnivå på en kompositbehållare medför risk för ruptur vid långtidspåverkan (30-60 minuter)?
- Vid vilket avstånd från ett antänt utsläpp dominerar stigkrafterna i förbränningsprodukterna?

## 8 Referenser

- Boverkets ändring av verkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (BBRAD 3), (2013).
- Abrahamsson, K. (2020). *Beräkningsmetod i sakkunnigutlåtande vid bilbränder med fokus på vindpåverkan* (Examensarbete, Issue).
- Bénichou, N., Adelzadeh, M., Singh, J., Gomaa, I., Elsagan, N., Kinateder, M., Ma, C., Gaur, A., Bwalya, A., & Sultan, M. (2021). *National Guide for Wildland-Urban Interface Fires*.
- Cirrone, D., Makarov, D., Friedrich, A., Grune, J., Takeno, K., & Molkov, V. (2022). Blast Wave Generated by Delayed Ignition of Under-Expanded Hydrogen Free Jet at Ambient and Cryogenic Temperatures. *Hydrogen*, 3(4), 433-449. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040027>
- Hansen, O. R. (2019, October 23). Hydrogen Safety: Kjørbo incident, overview and perspectives. MoZEES Workshop, Oslo, Norway.
- Hidalgo, J. P., Pironi, P., Hadden, R. M., & Welch, S. (2015). A framework for evaluating the thermal behaviour of carbon fibre composite materials. 2nd European Symposium of Fire Safety Science, Nicosia, Cyprus.
- Houf, W., Schefer, R., & Evans, G. (2008, March 30 – April 3). Analysis of Barriers for Mitigation of Unintended Releases of Hydrogen. Annual Hydrogen Conference and Hydrogen Expo USA, Sacramento, CA.
- IVA. (1981). *Skydd mot fria gasexplosioner i processindustrin*.
- Jallais, S., Vyazmina, E., Derek, M., & Thomas, J. (2018). Hydrogen Jet Vapor Cloud Explosion: A Model for Predicting Blast Size and Application to Risk Assessment. *Process Safety Progress*, 37(3), 397-410. <https://doi.org/000.21/0p0r2s/prs>
- Johansson, M., & Laine, L. (2012). *Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Del 1: Last av luftstötväg*. MSB449.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press Inc.
- Kim, Y., Makarov, D., Kashkarov, S., Joseph, P., & Molkov, V. (2017). Modelling heat transfer in an intumescent paint and its effect on fire resistance of on-board hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7297-7303. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.157>
- Kotchourko, A., & Jordan, T. (Eds.). (2022). *Hydrogen Safety for Energy Applications – Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards*. Elsevier.
- LaChance, J., Houf, W., Middleton, B., & Fluer, L. (2009). *Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards*.

- LaChance, J., Phillips, J., & Houf, W. (2010, May 16 - May 21). Risks Associated with the Use of Barriers in Hydrogen Refueling Stations. 8th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010, Essen, Germany.
- Lackman, T. (2017). *Värmeberäkningar säkerhetsfunktioner på gasflaskor och tid till läckage på kompositflaskor och explosion för aerosolflaskor.*
- Modak, A. T. (1977). Thermal radiation from pool fires. *Combustion and Flame*, 29, 177-192. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90106-7)
- Molkov, V. (2012). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering*. Bookboon.
- Molkov, V., & Saffers, J.-B. (2013). Hydrogen jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(19), 8141-8158. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.106>
- Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J. M. Watts, & C. Wieczorek (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2308-2428). [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_63](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_63)
- Tang, X., Dzieminska, E., Asahara, M., Hayashi, A. K., & Tsuboi, N. (2018). Numerical investigation of a high pressure hydrogen jet of 82 MPa with adaptive mesh refinement: Concentration and velocity distributions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(18), 9094-9109. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.089>
- Weibull, B. (2012). *Bemannade byggnader i processindustrin – Placering och dimensionerande explosionslaster med avseende på gasmolnexplosioner utombus.*
- Willoughby, D. B., & Royle, M. (2011). The interaction of hydrogen jet releases with walls and barriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2455-2461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.077>

# Bilaga A – Beräkningsmetod för stålbehållares motståndskraft mot infallande strålning

XXX

UTKAST



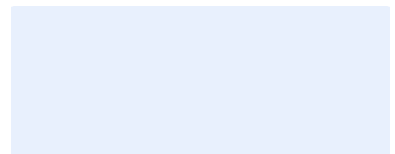
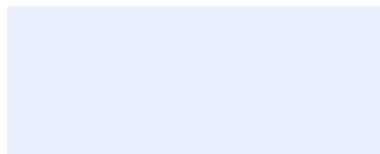


Myndigheten för  
samhällsskydd  
och beredskap

I samarbete med:



LUNDS  
UNIVERSITET



© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

651 81 Karlstad Tel 0771-240 240 [www.msb.se](http://www.msb.se)

Publ.nr **MSBxxxxx - månad år** ISBN **ISBN**