



LUND UNIVERSITY

Förslag på skyddsavstånd för vätgasinstallationer

Runefors, Marcus

2025

Document Version:
Manuskriptversion före sakkunniggranskning

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Runefors, M. (2025). *Förslag på skyddsavstånd för vätgasinstallationer*. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB).

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer



Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer

Tidsperiod: 2022-2025

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, 010-240 5415

Foto omslag: Bing Creative Commons

Text: Marcus Runefors

Tryck: DanagårdLiTHO

Publ. nr: MSB2186 – mars 2023

Tidigare utgiven: -

ISBN: 978-91-7927-384-2

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport. Författaren är ensamt ansvarig 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. Även kvantativ riskanalys (QRA) kan användas för att fastställa avstånd, men för detta hänvisas till andra rapporter. Det är dock viktigt att påpeka att, även om rapporten har framtagits i dialog med MSB, så är detta dokument inte på något sätt juridiskt bindande

Lund, 2024-05-22



Marcus Runefors

Avdelningen för Brandteknik, Lunds universitet

Innehåll

1	INLEDNING	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Verifieringsmetoder för säkerhetsavstånd.....	8
2	PÅVERKAN FRÅN VÄTGASINSTALLATIONER PÅ OMGIVNINGEN	10
2.1	Dimensionerande scenarier	10
2.2	Förutsättningar och antaganden	15
2.3	Skyddsvärda objekt	15
2.4	Skadekriterier per typ av objekt	17
2.5	Dimensionerande skadefall per skyddsvärt objekt	20
2.6	Påverkan av automatisk isolering samt begränsad vistelse	22
2.7	Beräkning av avstånd till olika påverkan	25
2.8	Sammanställning av avstånd	28
2.9	Jämförelse med avstånd enligt NFPA 2	32
3	PÅVERKAN FRÅN OMGIVNINGEN PÅ VÄTGASLAGRET	34
3.1	Kritisk påverkan på stålbehållare	34
3.2	Kompositbehållare	36
3.3	Påverkan från brand i byggnad	36
3.4	Påverkan från ansamling av brännbart material.....	37
3.5	Fordon.....	39
3.6	Skogsbrand	40
3.7	Övrigt	41
4	PÅVERKAN AV MURAR OCH ANDRA AVSKILJNINGAR	43
4.1	Skydd mot påverkan från anläggning till omgivning	43
4.2	Skydd mot påverkan från omgivning mot anläggning.....	45
4.3	Behov av motståndskraft mot tryckverkan och temperatur	46
4.4	Sammanställning avseende barriärer	47
5	SAMMANSTÄLLNING FÖR TABELL OCH SCENARIOBASERAD DIMENSIONERING AV AVSTÅND	49
5.1	Påverkan från vätgasinstallationen på omgivningen	49
5.2	Påverkan från omgivningen på vätgasinstallationen	53
6	SLUTSATSER.....	54
7	FÖRSLAG TILL VIDARE STUDIER	55
8	REFERENSER	56
	BILAGA A – BERÄKNINGSMETOD FÖR STÅLBEHÅLLARES MOTSTÅNDSKRAFT MOT INFALLANDE STRÅLNING	59
	BILAGA B – METOD FÖR HÄNSYN TILL RÖRTRYCKFALL	60

UTKAST

1 Inledning

I detta kapitel innehåller en beskrivning av bakgrunden till rapporten samt vilka alternativa sätt som finns för att beräkna säkerhetsavstånd.

1.1 Bakgrund

En av de största frågorna vid etablering av nya vätgasinstallationer är vilka avstånd som krävs till olika objekt i närområdet eftersom det 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 vätgasinstallationer så att det finns risk för en eskalation i form av t.ex. en tankruptur och dels om ett läckage på vätgasinstallationen 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 en föreskrift (2 kap 9 §) gällande avstånd med ett tillhörande 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 tvärtemot hur avstånden förändras i tabellen.

I de fall där lagringen inte regleras av tabellerna i MSBFS 2020:1 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 SS-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, 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 vätgasinstallationer av olika slag. Beräkningsmodellerna som har använts är vedertagna modeller baserade på analytiska uttryck. Inga CFD-analyser har 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 skyddsvärda objekt, dimensionerande hålstorlekar och kopplingen mellan dessa. Bedömningen har gjorts av rapportförfattaren i dialog med MSB, 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.

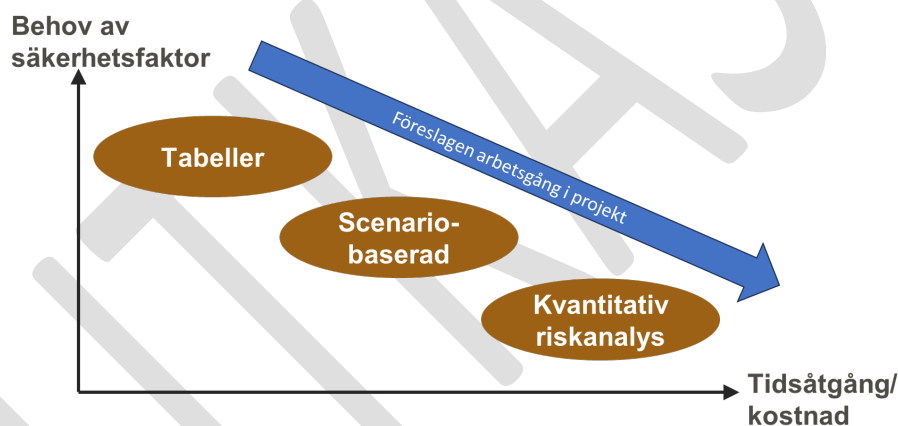
Vägledning angående avstånd finns även i H₂-TSA riktlinjerna från Energigas Sverige som i nuläget i stor utsträckning är baserade på de avstånd som presenterades i ett utkast till denna rapport med antaganden om största rördimensioner. Det är alltid ytterst den som vill uppföra en anläggning (normalt 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.

1.2 Verifieringsmetoder för säkerhetsavstånd

Som nämndes i föregående kapitel så finns det tre olika metoder för att fastställa säkerhetsavstånd. Den ena metoden, som traditionellt används i Sverige, är tabeller med angivna avstånd mellan gasinstallation och skyddsvärt objekt. Den andra är scenariobaserad som utgår från vissa ”dimensionerande skadefall” vilka ofta framgår av företagsinterna riktlinjer, handböcker/väglidningar eller branschstandarder. Den tredje metoden är kvantitativ riskanalys där data på frekvenser och sannolikheter kombinerat med konsekvensberäkningar jämförs med definierade acceptanskriterier.

I takt med att analysdjupet höjs från tabell, via scenariobaserad metod, till kvantitativ riskanalys blir analysen allt mer anläggningsspecifik och därmed kan säkerhetsfaktorn reduceras.



Figur 2. Tre principer för fastställande av skyddsavstånd.

Den arbetsgång som rekommenderas i denna rapport för att kunna uppnå tillräcklig säkerhet utan onödigt omfattande analys är att börja med de tabulerade avstånden i kapitel 5. Om dessa uppnås eller kan uppnås med rimliga åtgärder är det att föredra eftersom det ger en hög säkerhetsnivå och låg arbetsinsats. Om det inte bedöms vara rimligt så används istället den scenariobaserade metoden där egna beräkningar med handberäkningar och/eller CFD kan genomföras.

Scenarierna kan även vara användbara vid mindre avvikelser ifrån förutsättningarna för tabellen (t.ex. mindre luftspalt under en barriär). I de fall kan det i vissa fall vara tillräckligt att kvalitativt motivera att avstånden i tabellen kan

användas trots denna mindre avvikelse. I annat fall får fullständiga beräkningar genomföras.

Om det anses motiverat kan en djupare analys i form av en kvantitativ riskanalys genomföras som inte bara tar hänsyn till omgivningen för den aktuella anläggningen utan även vilka komponenter som finns samt antal komponenter. För uppgifter om läckagefrekvenser kan t.ex. HyRAM från Sandia användas och riskkriterierna bör normalt baseras på rekommenderade värden från IPS (Haeffler & Mares, 2012).

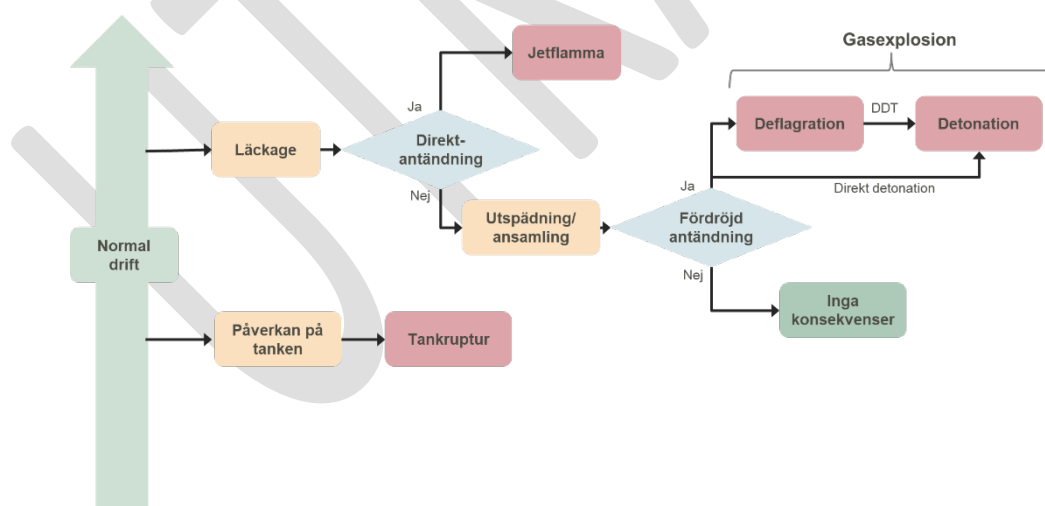
Ovanstående arbetsprocess har stora likheter med motsvarande för byggnadstekniskt brandskydd enligt Boverkets Byggregler (BBR). I de allmänna råden till BBR återfinns accepterade värden, t.ex. avseende gångavstånd. Det står dock projektören fritt att istället använda analytisk dimensionering enligt BBRAD. En sådan verifiering kan utföras som kvalitativ bedömning vilket kan baseras på t.ex. "logiska resonemang" på motsvarande sätt som för exemplet med liten luftspalt under barriären. Det kan även genomföras med scenarioanalys, motsvarande de dimensionerande skadefallen, eller med kvantitativ riskanalys.

2 Påverkan från vätgasinstallationer på omgivningen

I detta kapitel analyseras hur olika olycksfall inom vätgasinstallationen kan påverka olika skyddsvärda objekt 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 3.



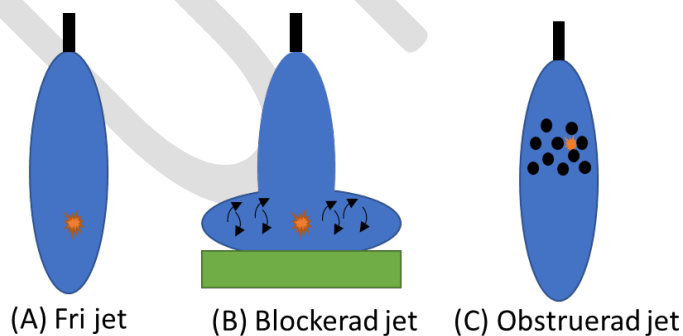
Figur 3. Sammanställning av olika olycksscenarier kopplat till vätgashantering. DDT är ett händelseförlopp där en deflagration accelererar och övergår i detonation.

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 kopplingar¹ i enlighet med MSB:s uppdaterade gashanteringsföreskrift som kommer att ersätta 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 skyddsvärda objekt 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.

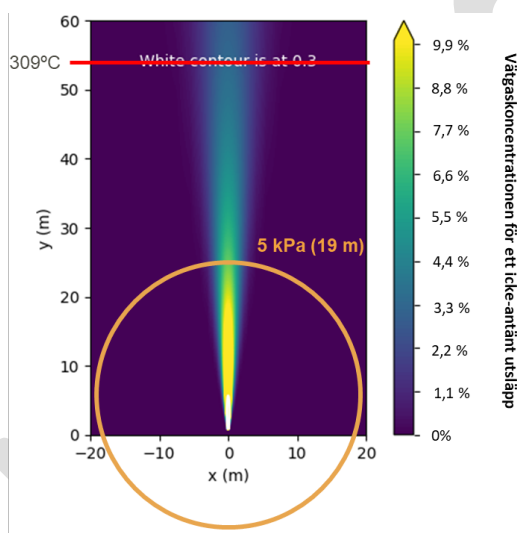
En tryckökning kan även ske utan ansamling genom att jetutsläppet antänds med viss fördröjning så att en brännbar blandning har bildats i anslutning till utsläppet. Den höga reaktiviteten hos vätgas kombinerat med det breda brännbarhetsområdet och turbulensen hos utsläppet gör att denna tryckvåg i vissa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



Figur 4. Typfall gällande fördröjd antändning av jetutsläpp. Orange markering indikerar plats för antändning.

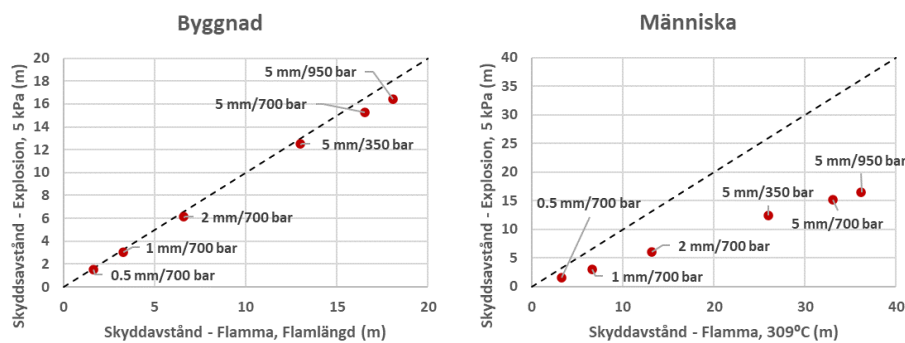
¹ I nuvarande regelverk så står det endast flänsar och gäller endast cisterner, men MSB planerar att införa motsvarande regler för alla typer av förband och behållare.

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 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 5 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 5. 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 6. 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 4 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 den sidan av väggen som var riktat mot utsläppspunkten. 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 (för 9,5 mm och 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 nästan 40 meter från ett tryck på maximalt 9,4 kPa. 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). Båda dessa studier indikerar att det skulle vara konservativt att bortse från hindret avseende övertryck vid beräkning av säkerhetsavstånd.

Det kan dock konstateras att en betydande tryckuppbyggnad i denna typ av scenario kunde noteras vid explosionen i Sandvika 2019². 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 m³ stökiometrisk vätgas-luftblandning enligt Hansen (2019)). Att jetutsläppet antas ha träffat en yta kan dock ha inneburit att den inledande

² Detta fall var en explosion i en tankstation i Norge där plåtar kastades ca 50 meter och glas gick sönder på 90 meters avstånd. Orsaken tros vara en läckande fläns utomhus även om utredningen inte är offentlig.

flamkärnan deformerats av turbulensen, men det bedöms som det omringande stora molnet med vätgas har varit en förutsättning för den förhållandevis stora konsekvensen³. Det understryker således vikten av att 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 flammen. För deflagrationer så är det främst vätgasblandningen inom det obstruerade området som bidrar till tryckökningen, men om deflagrationen övergår i detonation (DDT) 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) 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 vid 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 flammen (vilket ofta tas till minst 10 cm i CFD-sammanhang). Hur stort området behöver vara är svårt att bedöma, men troligen handlar det om en eller flera meter i respektive riktning. 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. Alternativt kan skyddsvärda objekt placeras med hänsyn till detta scenario som i så fall får beräknas från fall till fall.

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 en fri jetflamma. 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.

³ 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 och 32 meter till 309°C (som används som temperaturkriterium i denna rapport).

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 de skyddsvärda objekten 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 skyddas mot extern brand (till exempel 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) där så är möjligt⁴ och vid tre sammanhängande väggar rikta den öppna sidan bort från de skyddsvärda objekten. Vid tre eller fler sammanhängande väggar kan även explosionstryck till följd av ansamling behöva beaktas.

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 tryckkärlen utan **alla kopplingar** (dock ej helsvetsade rör). Ingen hänsyn tas till om vissa komponenter bara är vätgasfyllda vid vissa tillfällen. Notera dock att det i många fall går att minska avstånd genom att automatiskt detektera och isolera läckage (se kapitel 2.6).

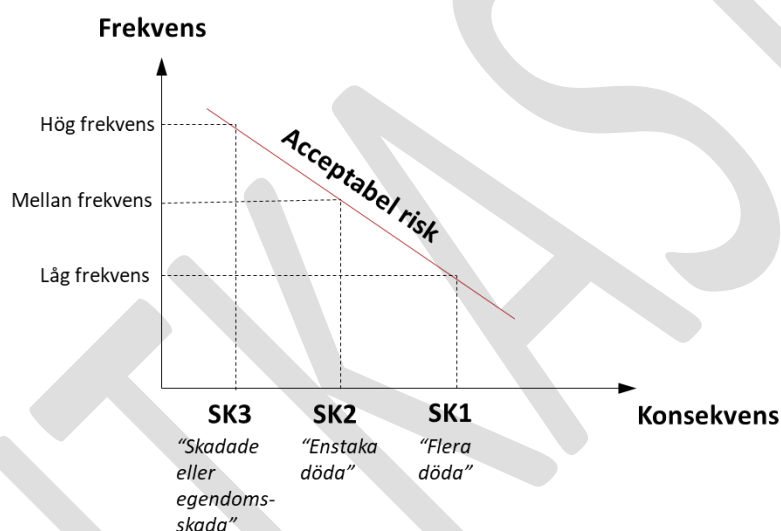
2.3 Skyddsvärda objekt

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 de svenska regelskrivarna primärt velat skydda från att en brand i omgivningen påverkar tryckkärlen och/eller att avstånd till vissa andra skyddsvärda objekt (t.ex. människor) kan vara svårare att fastställa. I denna rapport har dock även skyddsvärda objekt i form av människor inkluderats.

För att fastställa nödvändigt avstånd till skyddsvärda objekt 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

⁴ Notera att maximalt två sammanhängande vinkelräta väggar är ett krav enligt NFPA 2-2023 pkt 7.3.2.3.1.4(A)(5)

exempel antar NFPA 2 alltid ett läckage på 3% av tvärsnittsarean⁵ oavsett vad som hotas och analysen skiljer sig endast i att olika skyddsvärda objekt 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 F/N-kurvan jämförs med en lutande linje som motsvarar den acceptabla risken. Översatt till en mer deterministisk kontext 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) 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 skyddsvärt objekt som, om det påverkas, kan innebära att många personer omkommer medan SK3 normalt bara leder till egendomsskador eller enstaka skadade.



Figur 7. Samband mellan olika skyddsklasser och acceptabel sannolikhet för ett skadefall som påverkar skyddsklassen.

Givet hur de olika skyddsklasserna har definierats skulle nedanstående skyddsvärda objekt kunna definieras. I definitionen används verksamhetsklasserna från bygglagstiftningen 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 skyddsvärda objekt vara motiverat att definiera ytterligare skyddsvärda objekt. Det kan också vara aktuellt att flytta

⁵ Detta har sänkts till 1% i 2023-års utgåva.

skyddsvärda objekt mellan olika skyddsklasser baserat på de specifika förhållandena.

Tabell 1. Exempel på skyddsvärda objekt med tillhörande skyddsklass.

Skyddsklass	Skyddsvärt objekt	Kommentar
1	Koncentrerad folksamling	I vissa ovanliga fall kan personerna hindras från att snabbt lämna ett område, t.ex. på grund av mycket hög persontäthet ($>3 \text{ p/m}^2$) och detta påverkar skadekriterierna.
	Folksamling	För att underlätta användning begränsas detta till "väl avgränsat område" som t.ex. skolgård eller uteservering.
	Evakueringsväg från Vk2B eller Vk2C	Vid utrymning av stora samlingslokaler är det svårt att vända flöden. Kallades tidigare utrymningsväg.
	Luftintag till Vk5B till Vk5D	Inte möjligt att utrymma personer till det fria
2	Människor	Om människor bara vistas inom området i begränsad utsträckning kan det dimensionerande skadefallet reduceras, se diskussion i kapitel 2.5
	Mycket svårutrymd byggnad (Vk5B till Vk5D)	Om byggnad börjar brinna kan det påverka boende, men byggnadens brandskydd förväntas hindra att flera dödsfall uppstår.
	Luftintag till övrig byggnad	Kan medföra risk för gasexplosion inne i byggnaden.
	Mycket obstruktioner	Om flammen accelereras så kan en betydande tryckuppbyggnad uppstå.
	Andra gasbehållare	Tryckvåg och fragment kan leda till skador i närområdet
3	Övrig byggnad	Medför omfattande egendomsskador

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

2.4 Skadekriterier per typ av objekt

I kapitel 2.3 definierades olika skyddsvärda objekt som är objekt i omgivningen som ska skyddas mot påverkan. Vilken påverkan ett visst skyddsvärt objekt kan motstå är dock gemensamt för flera olika skyddsvärda objekt beroende på om det till exempel avser en människa eller en byggnad.

De tre första typerna av objekt som återfinns i Tabell 2 är människor, luftintag/öppningar samt byggnader. Utöver detta finns även en typ av objekt som

avser risk för eskalation på grund av detonation samt andra gasbehållare. Acceptabel påverkan på dessa återfinns i nedanstående tabell.

Tabell 2. Skadekriterium för olika typer av objekt. Understruket värde är det som ger längst avstånd och därmed blir dimensionerande för skyddsavstånd.

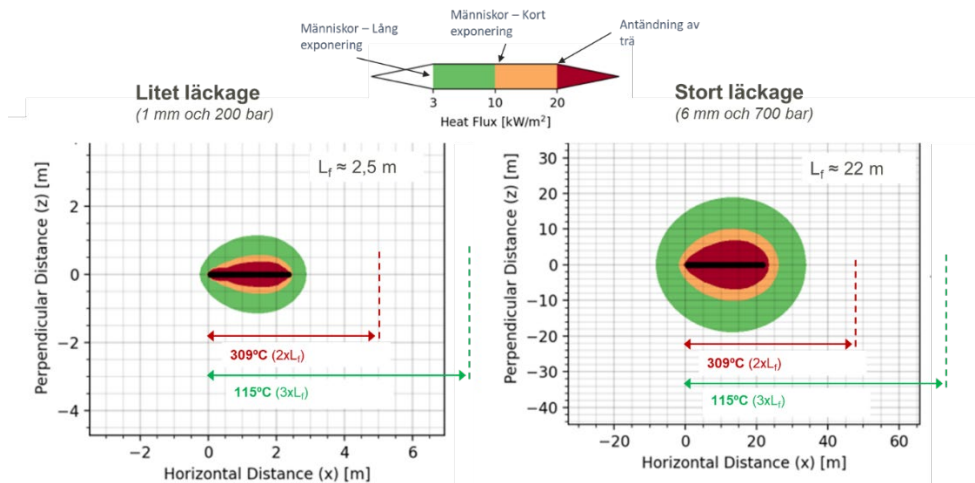
Typ av objekt	Vätgas-koncentration	Jetflamma	Strålning	Övertryck
Människa	8%	<u>115°C</u> <u>309°C</u> ^(a)	2,5 kW/m ² 10 kW/m ² ^(a)	10 kPa
Luftintag/öppning	8%	-	-	-
Byggnad	-	<u>Flamlängd</u>	<u>15 kW/m²</u>	10 kPa
Mycket obstruktioner	30%	-	-	-
Andra gasbehållare	-	<u>1,5·Flamlängd/</u> <u>Flamlängd</u> ^(b)	10 kW/m ² 30 kW/m ² ^(b)	-

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

^(b) Den lägre påverkan (1,5 flamlängder) används för behållare med låg motståndskraft och den högre (flamlängden) 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 förbrännings-temperaturen så kommer temperaturen i förbränningsprodukterna normalt att bli dimensionerande för en vätgasjetflamma⁶. När det gäller temperaturer kan det även konstateras att den varma gasen 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 accepteras 309°C vilket medför tredje gradens brännskada efter 20 sekunder enligt Molkov (2012) och om en hel person utsätts för denna temperatur orsakas medvetlöshet 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 varvid en högre temperatur kan accepteras. 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 eftersom flamlängden normalt motsvarar avståndet till 11% vid en oantänd jet (Molkov & Saffers, 2013) så kommer därför kommer avståndet till ovan nämnda temperaturer (som uppnås vid dubbla respektive tredubbla flamlängden) alltid vara längre.

⁶ Det bör dock noteras att de acceptanskriterier som normalt används är baserad på svartkroppsstrålning (värmestrålning) medan vätgasjetflammar har ett annat emissionsspektrum, men detta har inte beaktats i brist på information.



Figur 8. 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 5 att avståndet till 15-20 kW/m² är ungefär lika lång som flamlängden. Eftersom flaman kan förväntas antända byggnaden om den träffar fasaden så är dock den praktiska osäkerheten förhållandevis låg. Utifrån Figur 8 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 uppstår 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).

En gasbehållare ska skyddas mot jetflammar på egna anslutningar i enlighet med övriga föreskrifter, men utöver detta måste eskalation 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/m² eller 30 kW/m² vid 30 minuters påverkan. Höga temperaturer kan sannolikt också leda till ruptur på motsvarande sätt som strålning. För kompositbehållare kan det konstateras, baserat på Makarov et al. (2016), att en exponering på 600°C kan förväntas ge en ruptur efter ca 16 minuter och motsvarande för 800°C är 8-9 minuter. Detta motsvarar temperaturen i jetflammas centrumlinje på 1,4 respektive 1,2 flamlängders avstånd från utsläppspunkten. Påverkan från en jetflamma är också mycket mer lokal än vid ovanstående försök varvid tiden i realiteten är väsentligt mycket längre. Detta beror på att värmen leds bort längs med materialet och även att en viss omfördelning av krafter i materialet sker. Detta innebär att ett säkerhetsavstånd på 1,5 flamlängder bör ge en god säkerhet för personskador till följd av tankruptur för kompositbehållare. Som visat av Molkov et al. (2023) krävs inga avstånd för behållare som uppfyller Leak-Not-Break (LNB). Säkerhetsavståndet för kompositbehållare används även för stålbehållare med ”låg motståndskraft” (dvs under 2000 liter och 500 bar, se Tabell 11). De större stålbehållarna, som kategoriseras som ”hög motståndskraft”, har både en högre termisk tröghet och en större möjlighet att fördela temperaturen över en större yta och därmed anses flamlängden vara lämpligt dimensionerande kriterium. Eftersom tillgången på försöksdata är mycket begränsad så är bedömningen osäker, men det kan konstateras att acceptabel påverkan motsvarar eller understiger skadekriterierna enligt NFPA 2-2023 som är 20 kW/m² för andra gasbehållare (se pkt A.7.3.2.3.1.2) och är därmed mer konservativa.

2.5 Dimensionerande skadefall per skyddsvärt objekt

Som diskuterades i kapitel 2.3 så finns det en direkt koppling mellan konsekvensens allvarlighet (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 lagstiftningar på området. Nedan följer några exempel på principer i olika regler. Vanligen baseras dessa på den största förekommande rörstorleken 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
NPFA 2:2020	3% av area	Baserat på att täcka in 99% av alla läckage på en typisk tankstation samt ge en individrisk på under 2×10^{-5} (LaChance et al., 2009)
NFPA 2:2023	1% av area	Sänktes för att komma närmare en tankstation baserad på QRA
ISO 19880-1:2022	1 mm, 10% av area eller fullt rörbrott	Bara exempel som anges i bilaga A, men troligen normsättande
SEK Handbok 426 (ATEX)	0,025-0,1 mm ²	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 är inspirerat av ovanstående värden.

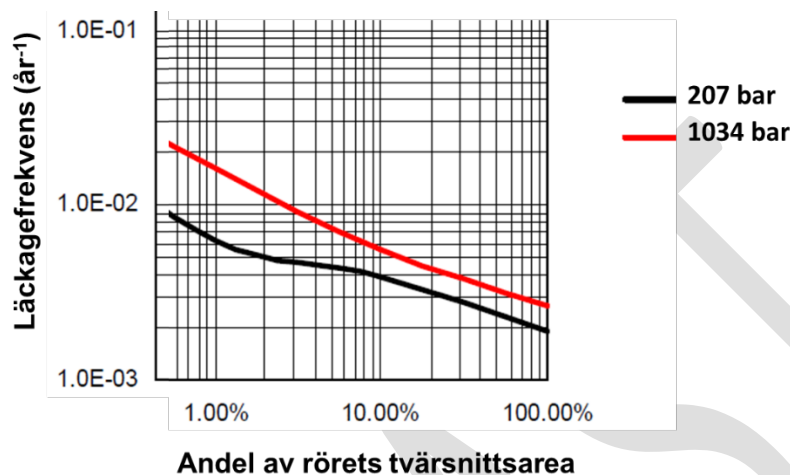
Tabell 4. Förslag på tre dimensionerande hålstorlekar

Beskrivning	Storlek
Litet	3% av area
Mellan	10% av area
Stort	Fullt rörbrott

Fullt rörbrott är ett mycket konservativt scenario som sällan har setts som dimensionerande för säkerhetsavstånd. Det skulle därmed kunna ifrågasättas om det är rimligt. I nedanstående figur framgår frekvensen för olika läckagestorlekar i den typanläggning som ligger till grund för NFPA 2 (LaChance et al., 2009). Det framgår där att skillnaden i frekvens mellan det minsta (1%) och det största (100%) är mindre än en faktor tio. Man kan även jämföra med beskrivningen av dimensionerande skadefall i IPS skrift ”Handledning om riskkriterier” (Haeffler & Mares, 2012) där frekvensen anges till 10^{-2} - 10^{-3} år⁻¹ för mindre allvarliga fall och 10^{-3} - 10^{-4} år för allvarliga fall (t.ex. dödsfall).

Som exempel på dimensionerande skadefall anges även ”*haverier på mindre ledningsdimensioner*”. Detta lyfter den relevanta frågan kring påverkan av rördimensionen där flertalet källor anger en väsentligt lägre frekvens på fulla rörbrott för grövre dimensioner (vanligen >50 mm) (se sammanställning i

LaChance et al. (2009)). Detta innebär fulla rörbrott inte nödvändigtvis måste beaktas vid grova ledningsdimensioner. I sådant fall kan annat allvarligt läckagescenario väljas, t.ex. ett hål på 50 mm.



Figur 9. Del av diagram från LaChance et al. (2009) som visar fördelning av läckagefrekvenser för den typanläggning som ligger till grund för NFPA 2.

Det anses därmed rimligt att beakta även detta scenario där det finns potential för mycket stora konsekvenser. Det ligger även i linje med principen om undvikande av katastrofer.

Det är också viktigt att notera att detta utsläpp inte är begränsat till själva behållarna utan kan inträffa varsomhelst längs rören. Så länge rören är helsvetsade och skyddade mot påkörning så kan det dock vara rimligt att bortse från rörsträckor utan kopplingar (jmf. SS-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.

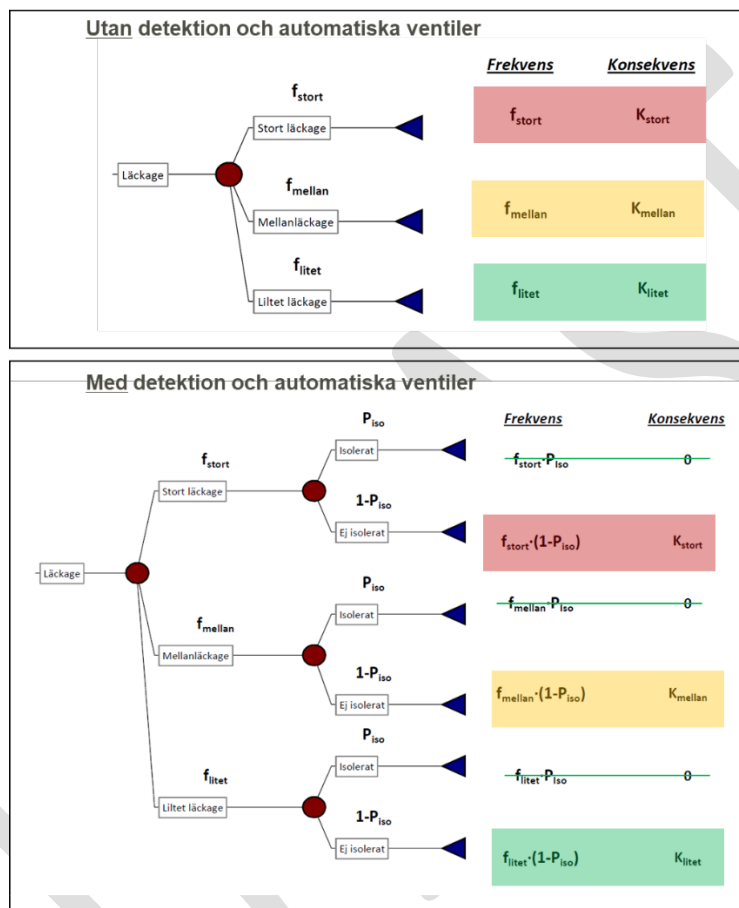
2.6 Påverkan av automatisk isolering samt begränsad vistelse

Om en anläggning förses med lämplig detektion⁷ och automatiska ventiler så kan detta, givet att de fungerar, minska frekvensen av långvariga utsläpp (>5-10 sekunder⁸). Om en enkel illustration av fallen med och utan denna form av utrustning görs med hjälp av två händelseträd så erhålls Figur 10.

⁷ I normala fall krävs ljuddetektion utomhus eftersom det är svårt att få jetutsläppen att nå vätgasdetektorer och dessutom reagerar dessa bara på icke-antända utsläpp.

⁸ Olika uppgifter kring detta finns, men det motsvarar tiden att detektera och isolera utsläppet samt för gasen inom den isolerade volymen att läcka ut.

Observera att denna är baserad på att det skyddsvärda objektet 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.

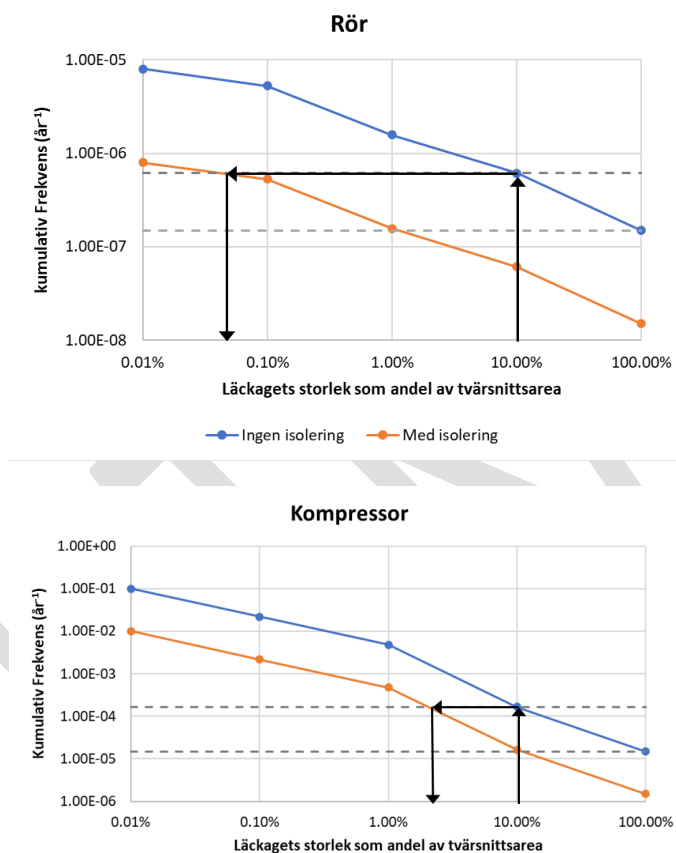


Figur 10. Illustration av ett händelsetråd för ett system med respektive utan detektion och automatiska ventiler baserat på att det skyddsvärda objektet kan motstå påverkan tills isoleringen har genomförts. P_{iso} är ett tal mellan 0 och 1 som anger sannolikheten för en framgångsrik isolering av utsläppet (dvs systemet fungerar som avsett).

Målet är att den färdiga installationen ska ha samma säkerhetsnivå oavsett om det har detektion och automatiska isolerventiler eller inte. Detta innebär att om ett dimensionerande skadefall med frekvensen f väljs för systemet utan detektion så ska ett dimensionerande skadefall med frekvensen $f \cdot (1 - P_{\text{iso}})$ väljas för system med detektion. Detta innebär att systemet med detektion kan ha skyddsavstånd dimensionerade för ett mindre håll med bibehållen säkerhetsnivå.

Hur stor skillnaden i hålstorlek är mellan de två alternativen beror på funktionssannolikheten för isoleringssystemet. Detta 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 detektion 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 11. Påverkan av automatiska avstängningsventiler på dimensionerande skadefall för rör respektive kompressor. Kumulativ frekvens utgör frekvensen för hål som motsvarar värdet på x-axeln eller högre.

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

konserverna fallet vilket är för kompressor. 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.

Samhällsrisk minskar även om personerna vistas på platsen en mindre del av tiden. Därför medges en reduktion av det dimensionerande en ”nivå” jämfört med om människor vistas på platsen mer eller mindre kontinuerligt. Ingen reduktion används dock i förhållande till vistelsetid för folksamling i enlighet med principen om undvikande av katastrofer.

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

Skyddsklass	Hålstorlek utan isoleringsmöjlighet eller där det skyddsvärda objektet inte kan motstå påverkan under 10 s	Hålstorlek med isoleringsmöjlighet eller för människor med begränsad vistelsetid
SK3 ("Skadade eller egendom")	Litet	Mycket litet (0,1%)
SK2 ("Enstaka döda")	Mellan	Litet
SK1 ("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, dels för antänt utsläpp i Tabell 6 och för icke-antänt utsläpp i Tabell 7. För vägledning kring andra tryck eller inre rördiametrar så hänvisas till vägledning i kapitel 2.8.

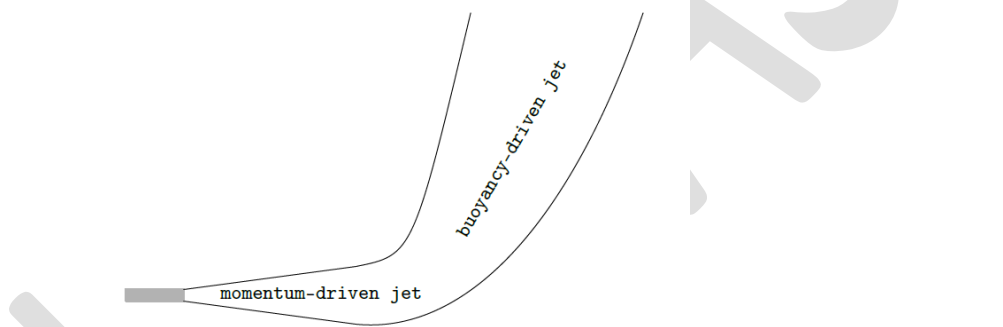
För samtliga beräkningar har modellerna för underexpanderade utsläpp från Molkov et al (2009) använts för att beräkna källstyrkan och storleken på den virtuella källan. Flamlängderna har beräknats med hjälp av Molkov & Saffers (2013) och utifrån detta har avstånden till 309°C och 115°C fastställts baserat på Molkov (2012, p. 204). För icke-antända utsläpp har avstånden beräknats med modellen från Chen och Rodi (1980) använts vilken har validerats för icke-expanderade utsläpp av Molkov (2012, p. 81).

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

Tryck	Hålstorlek								
	Liten (3%)			Mellan (10%)			Stort (100%)		
	Flam-längd	Till 309°C	Till 115°C	Flam-längd	Till 309°C	Till 115°C	Flam-längd	Till 309°C	Till 115°C
(bar)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
350	3,6	7,2	10,8	6,6	13,1	19,7	20,8	41,6	62,4
500	4,1	8,2	12,3	7,5	15,0	22,4	23,7	47,3	71,0
1000	5,1	10,2	15,3	9,3	18,6	27,9	29,4	58,8	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.

Eftersom förbränningsgaserna är mycket varma så är de även lätta och kommer därmed stiga på ett visst avstånd från utsläppskällan vilket illustreras i nedanstående figur.



Figur 12. Illustration av trögkraftsdominerat (momentum-driven) och stigningsdominerat (buoyancy-driven) del av ett utsläpp.

En modell för detta har nyligen tagits fram och artikeln är för tillfället under granskning. Modellen visar att nedanstående samband kan användas där D är rörets diameter i mm och P är trycket i bar(g).

$$\text{Stort (100\%): } x_{\text{stigningskraft}} = 1,69 \cdot D^{0,526} \cdot P^{0,237}$$

$$\text{Mellan (10\%): } x_{\text{stigningskraft}} = 0,92 \cdot D^{0,526} \cdot P^{0,237}$$

$$\text{Litet (3\%): } x_{\text{stigningskraft}} = 0,67 \cdot D^{0,526} \cdot P^{0,237}$$

I nedanstående tabell presenteras avstånden tills koncentrationen hos ett utsläpp har understigit 8% respektive 30% koncentration. För vägledning kring andra tryck eller inre rördiametrar hänvisas till vägledning i kapitel 2.8.

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 ₂ (m)	30% H ₂ (m)	8% H ₂ (m)	30% H ₂ (m)	8% H ₂ (m)	30% H ₂ (m)
350	4,4	0,9	7,9	1,6	25,1	5,2
500	5,0	1,0	9,1	1,9	28,8	6,0
1000	6,3	1,3	11,5	2,4	36,2	7,5

För större rör så kan, som tidigare nämnts, utsläppet vända uppåt innan ovanstående koncentrationer uppnås. En metod för att beräkna avståndet till detta uppstår för icke-antända utsläpp återfinns i Molkov (2012). Eftersom denna är något komplex att använda så har en regression utförts baserat på tryck i bar(g) och innerdiameter i mm och presenteras nedan. Denna ger ett fel på maximalt 5% jämfört med den exakta beräkningen och är alltid konservativ för det undersökta intervallet som är 20-1000 bar och 8-100 mm.

$$\text{Stort (100\%): } x_{\text{stignkraft}} = 2,5 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

$$\text{Mellan (10\%): } x_{\text{stignkraft}} = 1,35 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

$$\text{Litet (3\%): } x_{\text{stignkraft}} = 0,97 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

2.8 Sammanställning av avstånd

I detta kapitel presenteras avstånd för de skyddsvärda objekten som har identifierats.

Tabell 8. Dimensionerande skadefall per skyddsvärt objekt och isoleringsmöjlighet

Typ av objekt	Skyddsvärt objekt	Isolerings-möjlighet	Dimensionerande skadefall ²	Skadekriterium
Människor	Koncentrerad folksamling (SK1)	Ja	Stort ¹	309°C
		Nej	Stort	115°C
	Folksamling (SK1)	N/A	Stort	309°C
	Personer (SK2), hög närvaro	N/A	Mellan	309°C
	Personer (SK2), låg närvaro	N/A	Litet	309°C
Mycket svårutrymd byggnad	Byggnaden (SK2)	Ja	Litet	Flamlängd
		Nej	Mellan	Flamlängd
	Luftintag (SK1)	Ja	Mellan	8% H ₂
		Nej	Stort	8% H ₂
Samlingslokal	Utrymningsväg (SK1)	Ja	Mellan ³	309°C
		Nej	Stort	309°C
Byggnad i allmänhet	Byggnaden (SK3)	Ja	Mycket litet	Flamlängd
		Nej	Litet	Flamlängd
	Luftintag (SK2)	Ja	Litet	8% H ₂
		Nej	Mellan	8% H ₂
Övrigt	Mycket obstruktioner	N/A	Mellan	30% H ₂
	Andra gasbehållare	Ja	Litet	Flamlängd/ 1,5-Flamlängd ⁴
		Nej	Mellan	Flamlängd/ 1,5-Flamlängd ⁴

¹ Skadekriteriet ökas eftersom personerna bara behöver utså påverkan till isoleringen är färdig. De behöver även klara mellan-hålet och 115°C, men det ger alltid kortare avstånd.

² 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.

³ Reduktion med hänsyn till isolering kan genomföras eftersom utrymning inte förväntats ha påbörjats innan isoleringen har genomförts.

⁴ Den lägre påverkan (1,5 flamlängder) används för behållare med låg motståndskraft och den högre (flamlängden) 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 alla kopplingar och komponenter på hela vätgasinstallationen** (dock ej från helsvetsade rör).

Definitionen av flertalet av de skyddsvärda objekten anses vara uppenbar, men för övriga hänvisas till MSB:s gashandbok för att undvika risken för nyansskillnader mellan skrivningarna.

Tabell 9. Dimensionerande skadefall per skyddsvärt objekt beroende på isoleringsmöjlighet och lagringstryck. Tabellen är baserad på 8 mm innerdiameter på rör. Avstånd inom parentes är innan hänsyn till stikraften hos förbränningsgaserna.

Typ av objekt	Skyddsvärt objekt	Isolerings- möjlighet	350 bar ^a [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
Människor	Koncentrerad folksamling	Ja	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
		Nej	31,2 (62,4)	35,5 (71,0)	44,1 (88,1)
	Folksamling	N/A	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
	Personer, hög närvaro	N/A	12,5 (13,2)	14,1 (15,0)	18,0 (18,6)
	Personer, låg närvaro	N/A	7,2	8,2	10,2
Mycket svårutrymd byggnad	Byggnaden	Ja	3,6	4,1	5,1
		Nej	6,6	7,5	9,3
	Öppning, Luftintag	Ja	7,9	9,1	11,5
		Nej	25,1	28,8	36,2
Samlingslokal	Utrymningsväg	Ja	12,5 (13,2)	14,1 (15,0)	18,0 (18,6)
		Nej	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
Byggnad i allmänhet	Byggnaden	Ja	0,7	0,7	0,9
		Nej	3,6	4,1	5,1
	Öppning, Luftintag ^b	Ja	4,4	5,0	6,0
		Nej	7,9	9,1	11,5
Övrigt	Obstruerat område	N/A	1,6	1,9	2,4
	Andra	Ja	3,6 / 5,4	4,1 / 6,2	5,1 / 7,7
	Gasbehållare ^c	Nej	6,6 / 9,9	7,5 / 11,2	9,3 / 13,9

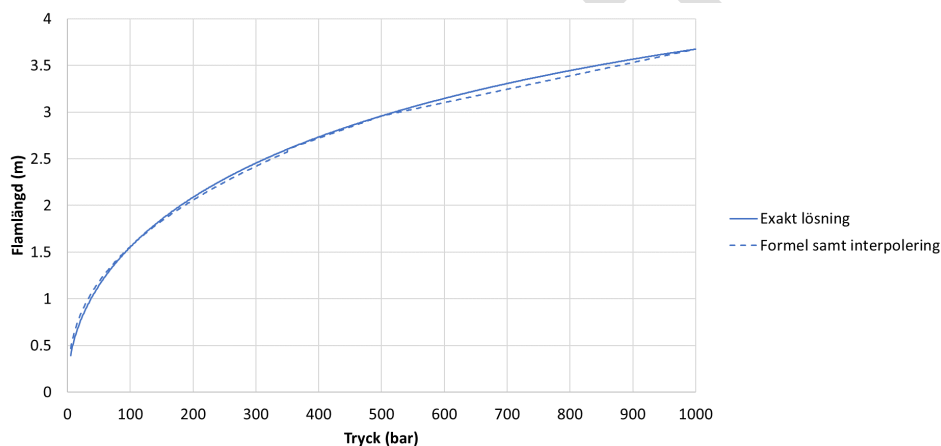
^a Avstånden för lägre tryck kan beräknas genom att multiplicera detta avstånd med faktorn $0,095 \cdot P^{0,4}$, där P är anläggningens tryck i bar.

^b Även andra konstruktioner som kan leda till instängning av vätgas, t.ex. skärmtak på en byggnad, behöver beaktas

° 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 tryck överstigande 350 bar så är sambandet mellan skyddsavstånd och tryck tämligen linjärt och därför kan linjärinterpolering mellan trycken användas. För lägre tryck är sambandet icke linjärt och därför har en enkel beräkningsmodell tagits fram och anges i not a ovan. Den innebär att om man till exempel har en anläggning med 10 bar så blir avståndet mellan anläggningen och enstaka personer med hög närvaro $0,095 \cdot 10^{0,4} \cdot 13,2 = 3,1$ meter vilket innebär en reduktion på 77%. Denna reduktion gäller för samtliga skyddsvärda objekt.

En jämförelse mellan de exakt beräknade avstånden och ovanstående förenklade metod med en formel upp till 350 bar och därefter linjärinterpolering återfinns i nedanstående figur.



Figur 13. Jämförelse mellan exakt beräkning och förenklad metod med formel mellan 5 och 350 bar samt linjärinterpolering 350-500 bar samt 500-1000 bar.

Som framgår så är avvikelsen mellan exakt beräkning och förenkling mycket begränsad och underskattningen av avståndet uppgår till maximalt 2%.

Hänsyn kan även tas till tryckfall mellan behållaren och läckagepunkten genom följande formler hämtade från bilaga B. I ekvationerna är $P_{x\%}$ trycket i utsläppspunkten för ett läckage på $x\%$ av rörarean, P_0 trycket i behållaren, L rörlängden från behållaren till utsläppspunkten och d är den inre rördiametern

$$\frac{P_{100\%}}{P_0} = \frac{790}{790 + L/d} \quad (\text{ekv 1})$$

$$\frac{P_{10\%}}{P_0} = \frac{2450}{2450 + L/d} \quad (\text{ekv 2})$$

$$\frac{P_{3\%}}{P_0} = \frac{4400}{4400 + L/d} \quad (\text{ekv 3})$$

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 2.9. 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 innerdiameterar än 8 mm kan genomföras med nedanstående ekvation då såväl flamlängder som avstånd till specifika vätgaskoncentrationer ökar linjärt med håldiameteren.

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

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**. Observera att siffror inom parentes ska användas där sådana finns eftersom den linjära omskalningen inte gäller efter hänsyn till stigkrafter har tagits

För skydd mot höga temperaturer eller hög vätgaskoncentration så bör det även kontrolleras att utsläppet inte har hunnit börja stiga uppåt innan det når det skyddsvärda objektet vilket kan beräknas enligt nedanstående ekvationer. Om detta ger ett kortare avstånd än det som har beräknats baserat på diameteren ovan så kan detta kortare avstånd istället användas.

Icke antända utsläpp:

$$\begin{aligned} \text{Stort (100\%): } x_{\text{stigma}} &= 2,5 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25} \\ \text{Mellan (10\%): } x_{\text{stigma}} &= 1,35 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25} \\ \text{Litet (3\%): } x_{\text{stigma}} &= 0,97 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25} \end{aligned}$$

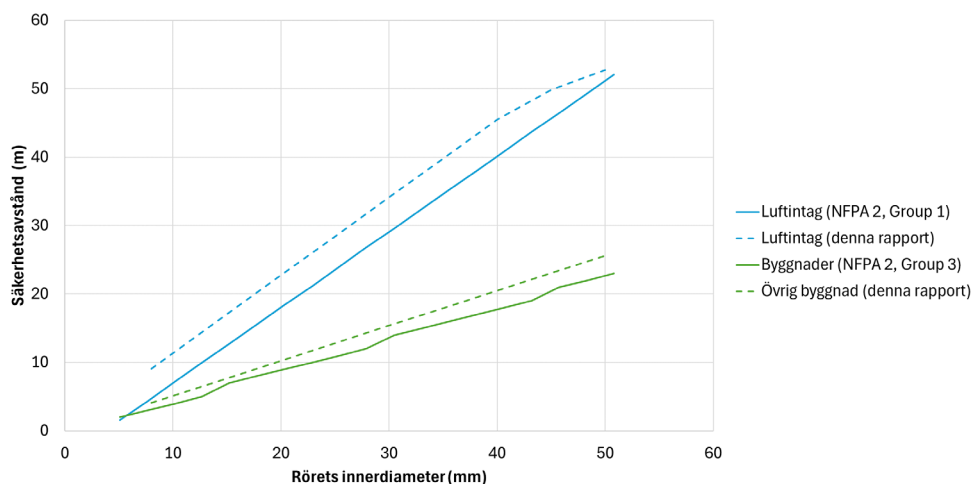
Antända utsläpp:

$$\begin{aligned} \text{Stort (100\%): } x_{\text{stigma}} &= 1,69 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237} \\ \text{Mellan (10\%): } x_{\text{stigma}} &= 0,92 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237} \\ \text{Litet (3\%): } x_{\text{stigma}} &= 0,67 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237} \end{aligned}$$

Observera att avstånden utan hänsyn till stigmakraft maximalt får halveras med hänsyn till stigmakraften eftersom vid detta avståndet kommer strålning och övertryck istället bli dimensionerande.

2.9 Jämförelse med avstånd enligt NFPA 2

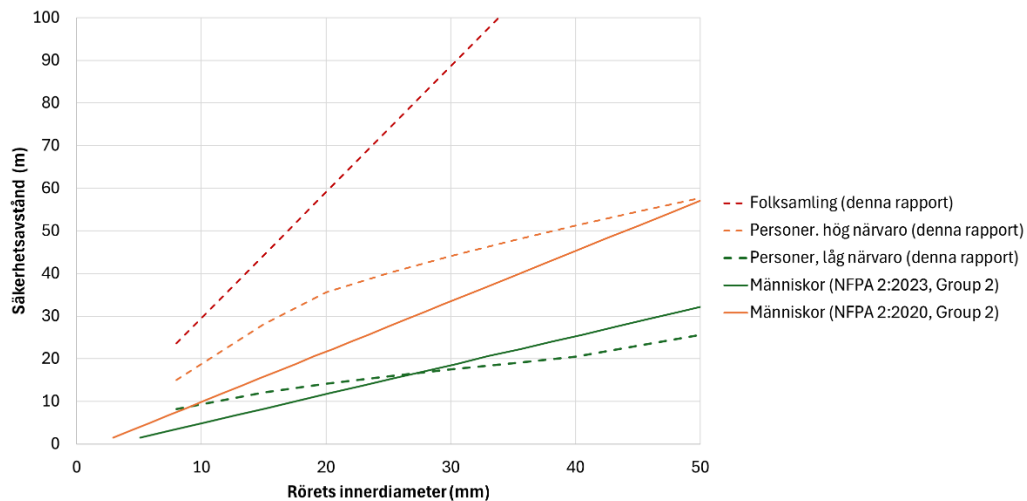
Det kan vara relevant att jämföra avstånden i denna rapport med de som framgår i NFPA 2-2023 som baserat på en rapport av Sandia National Laboratories (LaChance et al., 2009) utgår ifrån ett dimensionerande skadefall på 1% av rörarean. Dessa tar inte hänsyn till automatisk isolering och därmed så är nedanstående jämförelse för de föreslagna avstånden utan hänsyn till isolering.



Figur 14. Jämförelse mellan säkerhetsavstånden för byggnader och luftintag i NFPA 2-2023 jämfört med motsvarande för "övrig byggnad" utan hänsyn till isolering enligt denna rapport. Jämförelsen har gjorts för 500 bar.

Intressant nog så tyder detta på mycket liknande avstånd mellan de två förslagen trots olika dimensionerande skadefall. Detta beror troligen på den säkerhetsfaktor på 1,5 som appliceras på avstånd enligt NFPA 2 tillsammans med de lägre skadekriterierna. För "mycket svårutrymd byggnad" blir avstånden enligt denna rapport längre, men dessa jämförs inte eftersom det bedöms vara relativt ovanligt. Å andra sidan blir avstånden kortare om isolering är möjlig vilket som sagt inte beaktas i NFPA 2.

Nedan återfinns motsvarande jämförelse avseende avstånd till människor. Det är värt att notera att isolering inte påverkar dessa avstånd i de avstånd som föreslås i denna rapport vilket förenklar jämförelsen.



Figur 15. Jämförelse mellan säkerhetsavstånden för människor i NFPA 2 jämfört med motsvarande enligt denna rapport. Jämförelsen har gjorts för 500 bar.

Som framgår av ovanstående är avstånden för låg närvaro och små dimensioner liknande avstånden i den tidigare utgåvan av NFPA 2, men längre än nuvarande utgåva. I takt med att röret blir större så följer det ungefär nuvarande utgåva av NFPA 2. För hög närvaro liknar avstånden de för den tidigare utgåvan av NFPA 2, men klart längre än nuvarande utgåva. För folksamling är avstånden väsentligt längre, men detta fall anses relativt ovanligt.

3 Påverkan från omgivningen på vätgaslagret

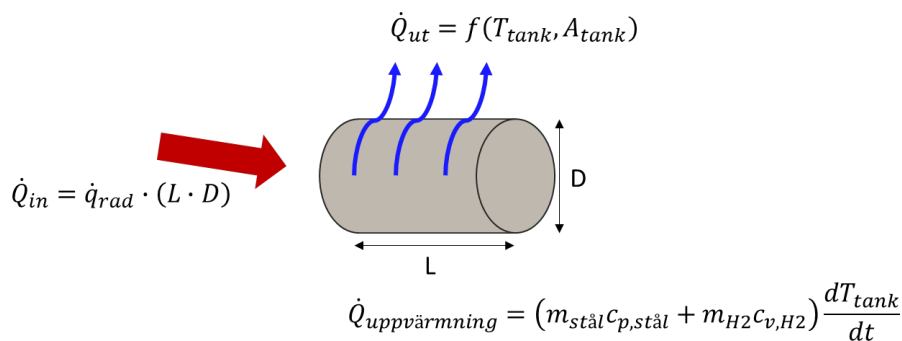
En brand i omgivningen kan i vissa fall leda till en tankruptur vilket ger mycket långa riskavstånd till följd av tryckvåg och fragment och måste därmed förhindras. Värmeöverföringen från branden sker främst genom strålning och olika typer av tryckkärl är olika känsliga för detta. Utifrån detta görs beräkningar av 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 aktiverar 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 drifttrycket, men i beräkningarna i denna rapport antas det att det maximala trycket som får uppnås är provtryckningstrycket som uppgår till 1,43 gånger högsta tillåtna tryck för aktuell behållare. 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 strålningssuppvärmningen. Metoden presenteras i bilaga A och illustreras i Figur 16.



Figur 16. Illustration av modell för uppvärmning av ståltankar

Principen innebär att såväl gas som själva behållaren antas ha samma temperatur, T_{tank} , till att börja med som ansätts som 20°C. 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 ²)
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 kW/m² istället för 41 kW/m².

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 ²)
Hög	>2000 liter <i>eller</i> >500 bar	30
Låg	Övriga behållare ¹	10

¹ 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 hemsida⁹.

3.2 Kompositbehållare

För kompositbehållare så finns det begränsad information tillgänglig för de låga strålningsnivåer som är aktuella när tryckkärlen ska motstå 30 minuters påverkan. Försök gjorda inom FireComp-projektet (Hidalgo et al., 2015) tyder på att materialet är opåverkat vid 10 kW/m², men påverkas vid 15 kW/m². Därför används, i väntan på mer exakt information, ett kritiskt värde på 10 kW/m². 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/m² över fönstrets area för bostäder, kontor, samlingslokaler och öppna parkeringshus och 168 kW/m² för affärer, industrier och lager. Detta är baserat på Margeret Laws forskning på 1960-talet som sedan har implementerats i många länders bygglagstiftning.

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.

⁹ Länk läggs in här i samband med att rapporten publiceras

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). 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 ¹	Kritisk strålning [kW/m ²]	Industribyggnad och motsv. ²		Kontor och motsv. ²	
		Obrännbar fasad	Brännbar fasad	Obrännbar fasad	Brännbar fasad
Hög	30	5 m (4 m)	7 m	5 m (2 m)	5 m (4 m)
Låg	10	9 m	13 m	6 m	9 m

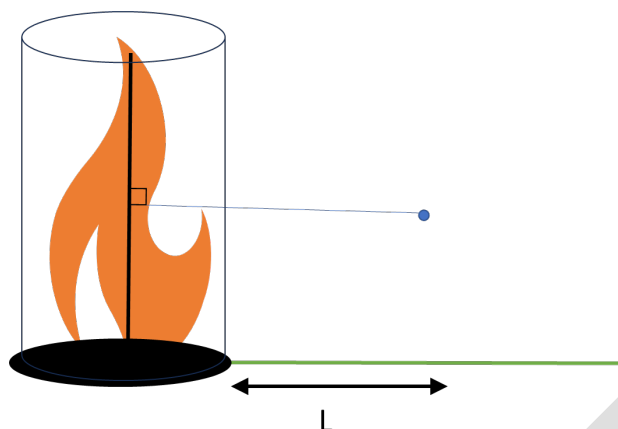
¹ Hög=stålbehållare >2000 l eller >500 bar, Låg=komposit samt övriga stålbehållare

² Ett minsta avstånd från byggnad på 5 meter används för att beakta risken för nedfallande byggnadsdelar. Avstånd som endast baseras på strålning anges inom parentes.

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. Flamhöjden 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 approximeras med en cylinder och strålmålet antas befinna sig på halva flamhöjden, men maximalt fem meter över marken (påverkar bara för de allra högsta effektutvecklingarna). En strålningsandel på 30% antas i beräkningarna.



Figur 17. 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/m²).

		Effektutveckling per golvyta (kW/m ²)				
		1500	2000	2500	3000	3500
Upplagets Area	10 m ²	5 m	6 m	6 m	7 m	8 m
	20 m ²	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m
	30 m ²	8 m	10 m	11 m	12 m	13 m
	40 m ²	9 m	11 m	12 m	14 m	15 m
	50 m ²	10 m	12 m	14 m	15 m	17 m

Tabell 14. Skyddsavstånd mellan ansamling av brännbart material och behållare med hög motståndskraft (30 kW/m²).

		Effektutveckling per golvyta (kW/m ²)				
		1500	2000	2500	3000	3500
Upplagets Area	10 m ²	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
	20 m ²	3 m	3 m	3 m	4 m	4 m
	30 m ²	3 m	4 m	4 m	5 m	5 m
	40 m ²	3 m	4 m	5 m	5 m	6 m
	50 m ²	4 m	4 m	5 m	6 m	6 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 m² (3x3) och därmed kan avstånden för 10 m² användas även om den verkliga arean är 21 m². Om den istället är placerad på långsidan så används (konservativt) värdena för en area på 50 m² (då 7x7 är 49 m²).

För att kunna använda tabellen så behöver en effektutveckling per golvyta att 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 ²)
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 flamhöjden och därför bör kolumnen för 3500 kW/m² i Tabell 13 och Tabell 14 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/m² resp. 30 kW/m²) 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 m². Om möbler och kartonger med PE-flaskor bedöms vara dimensionerande så kan en effektutveckling per kvadratmeter uppskattas till maximalt 2500 kW/m². Detta ger med samma kritiska strålningsnivåer som tidigare avstånd på 11 respektive 4 meter. I beräkningen har en maximal höjd på gaslagret på 5 meter samt en höjd på flaket på 1,35 m använts. Eftersom uppställningsplatser för bussar antas kunna användas av lastbilar så används samma dimensionerande avstånd.

Tabell 16. Skyddsavstånd mot påverkan av brand i fordon.

Behållarens motståndskraft ¹	Kritisk strålning [kW/m ²]	Personbil	Lastbil
Hög	30	2 m	4 m
Låg	10	3 m	11 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/m² och CC2 kan motstå upp till 25 kW/m². 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 objektet som ska skyddas 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.

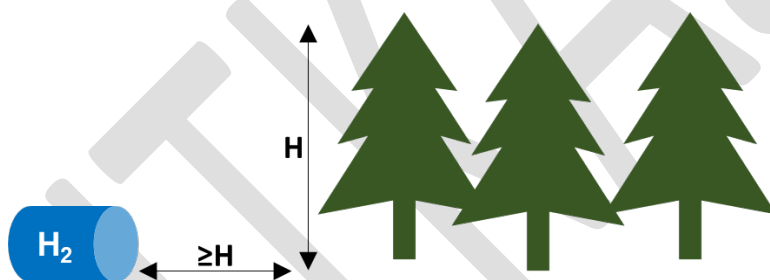
Tabell 17. Skyddsavstånd mot påverkan av skogsbrand.

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

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

² Ett minsta avstånd på 5 meter har ansatts för att ge ett grundläggande skydd mot nedfallande träd, men dock kan längre avstånd behövas för att beakta höjd på omgivande träd. Avstånd endast baserat på strålning anges inom parentes.

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



Figur 18. Hela vätgasinstallationen (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 18), påkörning av fordon och elektrostatisk uppladdning från spänningsförande ledare över 12,0 kV enligt nedan.

För väg anger Trafikverket¹⁰ att säkerhetsavstånd till bensinstation inte bör ligga närmare en väg än säkerhetsavståndet för aktuell skyltad hastighet. Detta säkerhetsavstånd framgår av VGU 2022 (Trafikverket, 2022) och beror, utöver referenshastigheten, även på trafikdensiteten. I nedanstående tabell har värden för den högsta trafikdensiteten använts.

¹⁰ <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/samhallsplanering/Sakerhet-och-konflikter/Riskfyllda-anlaggningar/>

Tabell 18. Skyddsavstånd mot väg.

Högsta tillåtna hastighet	Avstånd mellan vätgasinstallation och väg
≤ 30 km/tim	0 m
40 km/tim	2 m
60 km/tim	3 m
80 km/tim	8 m
≥ 100 km/tim	11 m

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

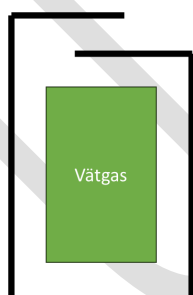
Källa: ELSÄK-FS 2022:1

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

Som beskrevs i kapitel 2.1 utgör barriärer ett bra skydd mot tryckverkan till följd av fördröjd antändning eftersom en betydande tryckökning främst sker när antändning sker i regioner med hög koncentration (ca 60% vätgas) vilket är nära utsläppskällan. Tryckverkan på själva barriären är också normalt begränsad vilket gör att de flesta normala byggnadsmaterial kan förväntas stå emot denna. Om fler än två väggar är sammanbyggda så minskar dock möjligheten för gasen att expandera samtidigt som gasen får minskade möjligheter att stiga upp och i sådana fall kan beräkningar av erforderlig tryckmotståndskraft behövas. En alternativ lösning är att ta fram en design där barriärerna inte hänger samman samtidigt som risken för jetflammar mot de skyddsvärda objekten beaktas, t.ex. enligt nedanstående princip

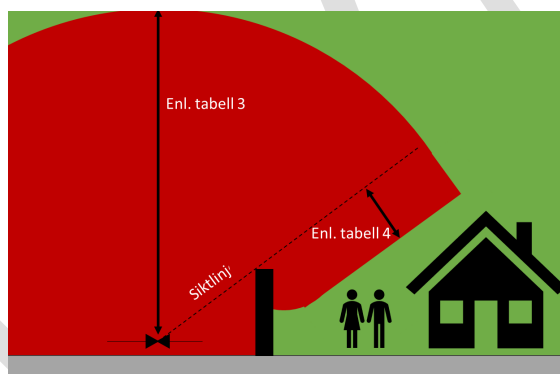


Figur 19. Exempel på utformning med tre barriärer där risken för instängd gas minimeras.

Givet att barriärerna kan skydda mot tryckvågen består det dimensionerande fallet av ett utsläpp som är riktat precis ovanför eller vid sidan av barriären. Vanligtvis används skymd siktlinje mellan utsläppskälla och det skyddsvärda objektet som kriterium för storleken på barriären, men detta försummar strålningen från jetflamman. Även om denna är lägre för vätgas än för kolväten så kan den inte försummas, särskilt inte för mer sårbara mål som människor.

Avgiven strålning kan beräknas med hjälp metodiken beskriven av Schefer et al. (2006) där det framgår att strålningen är som högst vid ca 70% av flamlängden. Om man vid denna punkt mäter avståndet vinkelrätt ut till där strålningen understiger ett visst värde så blir denna en viss andel av flamlängden för ett fast värde på flammans strålningsandel. Detta avstånd antas (konservativt) gälla längs hela flammen. Dessvärre är strålningsandelen beroende av utsläppet på ett icke-linjärt sätt genom en storhet som kallas "flame residence time" och ökar från 2,5% vid 1 mm hålstorlek till 13,5% vid 25 mm (i princip oberoende av trycknivå). Aktuell beräkning utgår från ett rör på 25 mm för beräkning av strålningsandel och sedan 3%, 10% eller 100% av denna beroende på scenario. Detta ger strålningsandelar på 5,4%, 7,4% respektive 13,5%. För ett rör på 8 mm och 350 bar innebär det en överskattning av avstånden för 3%-scenariot på 0,2-0,3 m, för 10%-scenariot 0,4-0,6 m samt för 100% scenariot 1,5-2,7 m. Detta anses som acceptabel konservatism och denna minskar som andel av avståndet för större rör.

Principen illustreras i nedanstående figur. För icke-antända utsläpp mot luftintag samt för obstruerat område krävs inget avstånd i förhållande till siktlinjen. Inte heller för det allra minsta hålet (0,1%) krävs avstånd i förhållande till siktlinjen eftersom hålet är så litet att även för det stora 25 mm röret så är strålningsandelen endast 1%.



Figur 20. Princip för reduktion av avstånd med hjälp av barriär. Det skyddsvärda objektet får befinna sig inom grönt område.

Utifrån detta, de dimensionerande skadefallen i Tabell 3 och skadekriterierna per typ av objekt i Tabell 2 kan avstånd för rör med innerdiameter på 8 mm beräknas. Dessa framgår i tabellen nedan. För andra rördiametrar så kan motsvarande omskalning som för ordinarie avstånd användas (dock utan korrektion för stigningskraft).

Tabell 20. Minsta avstånd mellan siktlinjen och det skyddsvärda objektet vid användning av barriär. Tabellen är baserad på 8 mm innerdiameter på rör.

Typ av objekt	Skyddsvärt objekt	Isolerings-möjlighet	350 bar ^a [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
Människor	Folksamling ^b	N/A	5,8	10,0	13,4
	Personer, hög närvaro	N/A	1,2	2,2	3,0
	Personer, låg närvaro	N/A	0,5	1,0	1,3
Mycket svårutrymd byggnad	Byggnaden	Ja	0,4	0,7	1,0
		Nej	0,9	1,7	2,3
	Luftintag, öppning	Ja	0,0	0,0	0,0
		Nej	0,0	0,0	0,0
Samlingslokal	Utrymningsväg	Ja	1,2	2,2	3,0
		Nej	5,8	10,0	13,4
Byggnad i allmänhet	Byggnaden	Ja	0,0	0,0	0,0
		Nej	0,4	0,7	1,0
	Luftintag, öppning	Ja	0,0	0,0	0,0
		Nej	0,0	0,0	0,0
Övrigt	Obstruerat område	N/A	0,0	0,0	0,0
	Andra	Ja	0,2 / 0,5	0,4 / 1,0	0,6 / 1,3
	Gasbehållare ^c	Nej	0,5 / 1,2	1,0 / 2,2	1,4 / 3,0

^a Avstånden för lägre tryck kan beräknas genom att multiplicera detta avstånd med faktorn $0,095 \cdot P^{0,4}$, där P är anläggningens tryck i bar.

^b För koncentrerad folksamling, dvs där personerna inte snabbt kan lämna platsen, blir beräkningsmetodiken för konservativ och därmed bör en specifik strålningsberäkning genomföras för dessa fall.

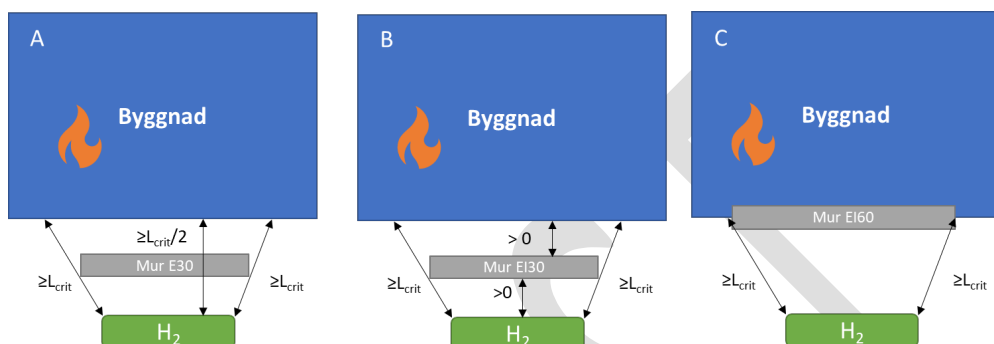
^c Det längre avståndet används för behållare med låg motståndskraft och det kortare för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

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 består påverkan 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 fysisk 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 fysisk barriär med isolerande förmåga (dvs I-klass) så kommer temperaturen på motsatt sida maximalt vara 180°C vid en påverkan enligt ISO-branden (se SS-EN 13501-2:2023). 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 21. Brandteknisk klass, minsta avstånd och storlek på avskiljning för skydd av spridning från byggnad till lager. L_{crit} är avståndet för kritisk strålning enl. kap 3.

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 mot tryckverkan och temperatur

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 vätgastryck 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 jetflammar.

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 vätgasjetflamma 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 21. Avskiljningars påverkan på skyddsavstånd.

Riktning	Klass	Avstånd
Från byggnad (eller annan närliggande brand) mot lager	E30	Halveras ^(a)
	EI30	Inget avstånd ^(a) , men dock ej sammanbyggda
	EI60	Muren kan vara sammanbyggd med byggnaden ^(a)
Från koppling på gas-installation mot luftintag/obstruktioner	Ingen klass	Avståndet mäts längs siktlinjen från komponenten till luftintag/obstruktion
	EI60	Se kapitel 4.1
	E30	Se kapitel 4.1

^(a) 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.

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 tabell och scenariobaserad dimensionering av avstånd

5.1 Påverkan från vätgasinstallationen på omgivningen

Avstånden avrundas här till hela meter, men det går även att använda avstånden med en decimal som återfinns i Tabell 9 vilken också kan vara att föredra vid omskalning och/eller små avstånd.

Tabell 22. Sammanställning av avstånd från komponent/koppling på vätgasinstallationen och skyddsvärt objekt baserat på ett rör med innerdiameter 8 mm. Avstånd inom parentes är avstånd innan hänsyn till stigning är tagen och är den som ska användas vid omskalning till andra rördimensioner.

Typ av objekt	Skyddsvärt objekt	Isolerings-möjlighet	350 bar ^a [m]	500 bar [m]	1000 bar [m]
Människor	Koncentrerad folksamling	Ja	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
		Nej	31,2 (62,4)	35,5 (71,0)	44,1 (88,1)
	Folksamling	N/A	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
	Personer, hög närvaro	N/A	12,5 (13,2)	14,1 (15,0)	18,0 (18,6)
	Personer, låg närvaro	N/A	7,2	8,2	10,2
Mycket svårutrymd byggnad	Byggnaden	Ja	3,6	4,1	5,1
		Nej	6,6	7,5	9,3
	Luftintag, öppning	Ja	7,9	9,1	11,5
		Nej	25,1	28,8	36,2
Samlingslokal	Utrymningsväg	Ja	12,5 (13,2)	14,1 (15,0)	18,0 (18,6)
		Nej	20,8 (41,6)	23,7 (47,3)	29,4 (58,8)
Byggnad i allmänhet	Byggnaden	Ja	0,7	0,7	0,9
		Nej	3,6	4,1	5,1
	Luftintag, öppning ^b	Ja	4,4	5,0	6,0
		Nej	7,9	9,1	11,5
Övrigt	Obstruerat område	N/A	1,6	1,9	2,4
	Andra	Ja	3,6 / 5,4	4,1 / 6,2	5,1 / 7,7
	Gasbehållare ^c	Nej	6,6 / 9,9	7,5 / 11,2	9,3 / 13,9

^a Avstånden för lägre tryck kan beräknas genom att multiplicera detta avstånd med faktorn $0,095 \cdot P^{0,4}$, där P är anläggningens tryck i bar.

^b Även andra konstruktioner som kan leda till instängning av vätgas, t.ex. skärmtak på en byggnad, behöver beaktas

^c 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. Observera att avstånden inom parentes ovan ska användas eftersom det är dessa om är innan hänsyn till stigning är tagen.

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

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.

Hänsyn till stignkraften hos förbränningsgaserna eller vätgasen kan tas med följande samband. I grunden väljs det lägsta värdet av $x_{stignkraft}$ och x_D , men dock får x_D maximalt halveras eftersom strålning och övertryck då istället blir dimensionerande.

Icke antända utsläpp:

$$\text{Stort (100\%): } x_{stignkraft} = 2,5 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

$$\text{Mellan (10\%): } x_{stignkraft} = 1,35 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

$$\text{Litet (3\%): } x_{stignkraft} = 0,97 \cdot D^{0,54} \cdot p^{0,25}$$

Antända utsläpp:

$$\text{Stort (100\%): } x_{stignkraft} = 1,69 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237}$$

$$\text{Mellan (10\%): } x_{stignkraft} = 0,92 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237}$$

$$\text{Litet (3\%): } x_{stignkraft} = 0,67 \cdot D^{0,526} \cdot p^{0,237}$$

Observera att avstånden aldrig kan mer än halveras eftersom då kommer istället andra skadekriterier som strålning och övertryck bli dimensionerande.

För barriärer utgår avstånden från minsta avstånd i förhållande till siktlinjen och presenteras i **Tabell 20** (s.45) samt **Figur 20** (s.44).

Vid egna beräkningar så kan nedanstående scenarier och skadekriterium användas.

Tabell 23. Dimensionerande skadefall per skyddsvärt objekt och isoleringsmöjlighet

Typ av objekt	Skyddsvärt objekt	Isolerings-möjlighet	Dimensionerande skadefall ²	Skadekriterium
Människor	Koncentrerad folksamling (SK1)	Ja	Stort ¹	309°C
		Nej	Stort	115°C
	Folksamling (SK1)	N/A	Stort	309°C
	Personer (SK2), hög närvaro	N/A	Mellan	309°C
	Personer (SK2), låg närvaro	N/A	Litet	309°C
Mycket svårutrymd byggnad	Byggnaden (SK2)	Ja	Litet	Flamlängd
		Nej	Mellan	Flamlängd
	Luftintag öppning (SK1)	Ja	Mellan	8% H ₂
		Nej	Stort	8% H ₂
Samlingslokal	Utrymningsväg (SK1)	Ja	Mellan ³	309°C
		Nej	Stort	309°C
Byggnad i allmänhet	Byggnaden (SK3)	Ja	Mycket litet	Flamlängd
		Nej	Litet	Flamlängd
	Luftintag öppning (SK2)	Ja	Litet	8% H ₂
		Nej	Mellan	8% H ₂
Övrigt	Mycket obstruktioner	N/A	Mellan	30% H ₂
	Andra gasbehållare	Ja	Litet	Flamlängd/ 1,5·Flamlängd ⁴
		Nej	Mellan	Flamlängd/ 1,5·Flamlängd ⁴

¹ Skadekriteriet ökas eftersom personerna bara behöver utså påverkan till isoleringen är färdig. De behöver även klara mellan-hålet och 115°C, men det ger alltid kortare avstånd.

² 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.

³ Reduktion med hänsyn till isolering kan genomföras eftersom utrymning inte förväntats ha påbörjats innan isoleringen har genomförts.

⁴ Den lägre påverkan (1,5 flamlängder) används för behållare med låg motståndskraft och den högre (flamlängden) för de med hög motståndskraft enligt kap 3.1 och 3.2.

5.2 Påverkan från omgivningen på vätgasinstallationen

I Tabell 23 återfinns en förenklad form av tabellerna i kapitel 2.9 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 ¹	
	Låg	Hög
Stor mängd brännbart material²	12 m	5 m
Industribyggnad och motsv. Obrännbar fasad	9 m	5 m
Industribyggnad och motsv. Brännbar fasad	13 m	7 m
Kontor och motsv. Obrännbar fasad	6 m	5 m
Kontor och motsv. Brännbar fasad	9 m	5 m
Uppställd personbil	3 m	2 m
Uppställd lastbil	12 m	6 m
Skog³	10 m	5 m
Kraftledning⁴	15-60 m	15-60 m
Väg⁵	10-25 m	10-25 m

¹ Avstånden (förutom för kraftledning och väg) kan halveras med en avskiljning i klass E30. Vid EI30 krävs inga avstånd, men avskiljningen får inte ingå i byggnadens konstruktion. Vid en klass på EI60 får avskiljningen vara en del av byggnadens konstruktion.

² Baserat på 3000 kW/m² och 30 m² enl. kap 3.4

³ Observera att avstånden måste vara så stora att träden inte kan falla ner på behållaren.

⁴ Beroende på konstruktionsspänning se kap 3.7

⁵ Beroende på hastighet se kap 3.7

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

Eventuell barriär ska ha en höjd och bredd så att avståndet till riskkällan till behållaren blir minst det ursprungliga säkerhetsavståndet för fallet utan barriär (se Figur 21, s.46).

6 Slutsatser

Avsikten med denna rapport är att den ska kunna utgöra ett underlag för att fastställa nödvändigt skyddsavstånd vid etablering av vätgasinstallationer genom att tillhandahålla både tabeller och dimensionerande skadefall för egna beräkningar. Dessa är medvetet konservativt valda för att ge tillräcklig säkerhet oavsett hur anläggningen är utformad. Det kan emellertid göra att avstånden blir orimligt långa för vissa tillämpningar. För dessa fall finns möjligheten att genomföra en full kvantitativ riskanalys (QRA) för att visa att säkerhetsnivån ändå är tillräcklig. Avsikten med de tabeller som finns i denna rapport är att undvika att behöva göra detta för alla anläggningar.

Även om rapporten har tagits fram i dialog med MSB bör det 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 NFPA2¹¹ 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 erforderliga avstånd ska bli tydliga för aktörer som vill etablera vätgasinstallationer och minska tiden för tillståndsärenden för att på så sätt inte hindra den nödvändiga gröna omställningen.

¹¹ Detta sänktes dock till 1% i senaste utgåvan.

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?
- Vilken strålningsnivå på en kompositbehållare medför risk för ruptur vid långtidspåverkan (30-60 minuter)?

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., Kinatader, M., Ma, C., Gaur, A., Bwalya, A., & Sultan, M. (2021). *National Guide for Wildland-Urban Interface Fires*.
- Chen, C., & Rodi, W. (1980). *Vertical turbulent buoyant jets - a review of experimental data*. Pergamon Press.
- 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>
- Haeffler, L., & Mares, I. (2012). *Handledning om riskkriterier*.
- 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 luftstöt våg*. MSB449.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press Inc.
- 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.*
- Makarov, D., Kim, Y., Kashkarov, S., & Molkov, V. (2016). Thermal Protection and Fire Resistance of High-Pressure Hydrogen Storage. Eighth International Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH8),
- Molkov, V. (2012). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering*. Bookboon.
- Molkov, V., Kashkarov, S., Makarov, D., Fletcher, J., & Rattigan, W. (2023). Explosion free in fire self-venting (TPRD-less) Type IV tanks: Validation under extreme impinging 70 MPa hydrogen jet fire conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(100), 40117-40126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.020>
- Molkov, V., Makarov, D., & Bragin, M. (2009). Physics and modeling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere. 24th International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, Russia.
- 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
- Schefer, R., Houf, W., Bourne, B., & Colton, J. (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1332-1340. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.020>
- 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>
- Trafikverket. (2022). *Vägars och gators utformning* (2022:001).
- Weibull, B. (2012). *Bemannade byggnader i processindustrin – Placering och dimensionerande explosionslaster med avseende på gasolnsexplosioner 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>

UTKAST

Bilaga A – Beräkningsmetod för stålbehållares motståndskraft mot infallande strålning

XXX

UTKAST

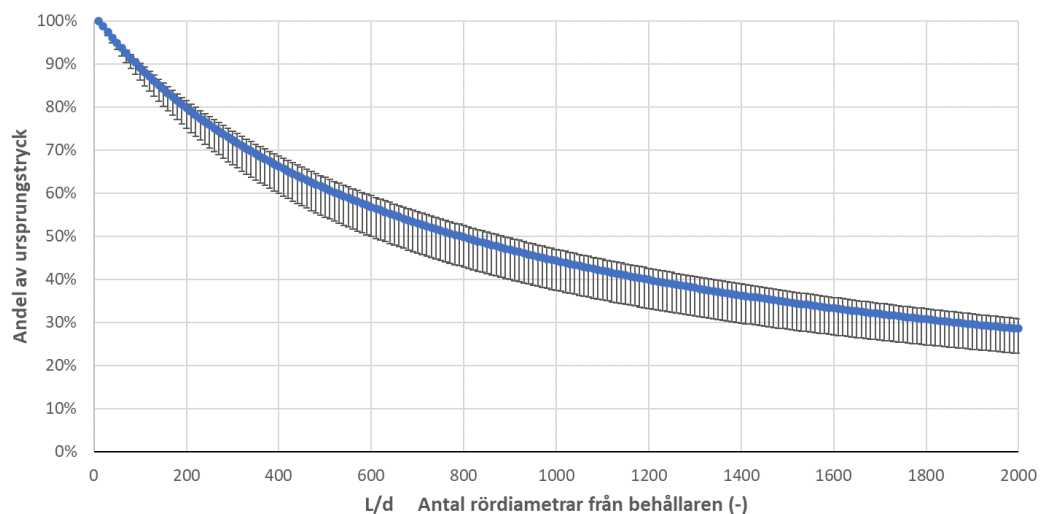
Bilaga B – Metod för hänsyn till rörtryckfall

Utsläppsberäkningar försummar normalt tryckfall i röret mellan behållaren och utsläppspunkten. Om hålet uppstår mitt på en behållare eller om hålet är mycket litet i förhållande till rörets storlek så är det ett rimligt antagande, men särskilt för fullt rörbrott så leder det till överkonservativa beräkningar.

Det bör noteras att tryckfallsberäkningar för rör utgår från fallet när flödet är stabilt (även kallat steady-state). Precis i anslutning till när hålet uppstår på en ledning så flödar inte gasen hela vägen från behållaren utan strömmar ut från området innanför läckaget. Det innebär att rörtryckfallet inte påverkar på samma sätt. Å andra sidan innebär omformningen av strömningen i röret och att luften utanför hålet måste tryckas undan att andra typer av fenomen, som bedöms minska avstånd till en given koncentration jämfört med det stationära fallet, uppstår. Detta gör att denna korta initiala fas i normalfallet inte bör behöva beaktas utan analysen kan utgå från det stationära fallet. Detta antagande ligger till grund för den metod som beskrivs i denna bilaga.

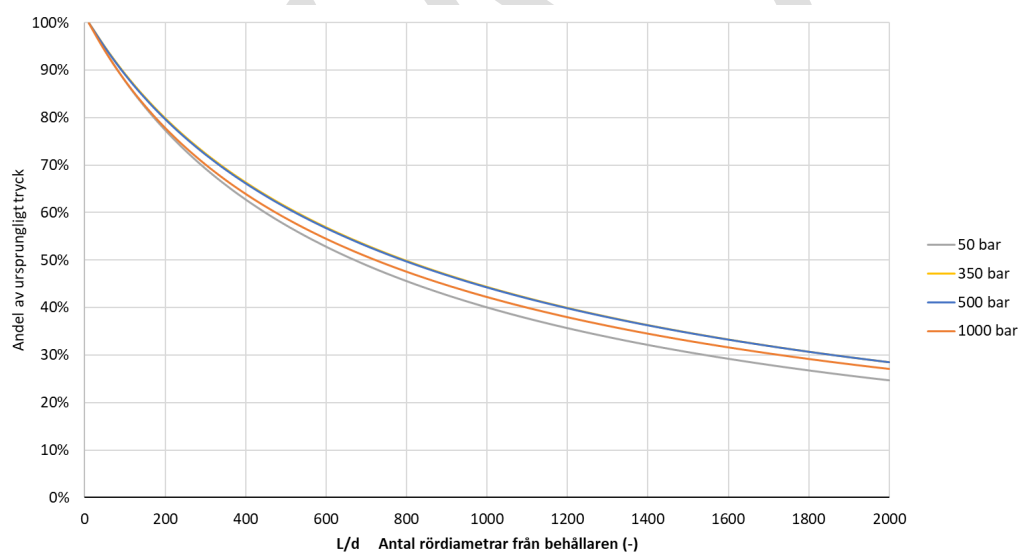
En metod för att ta hänsyn till rörtryckfall beskrivs i Molkov och Bragin (2009). Dock så kräver metoden att man numeriskt löser ett större ekvationssystem vilket kan vara utmanande. Därför har en förenklad metod baserad på beräkningar utförda enligt Molkov och Bragin (2009) tagits fram som beskrivs i denna bilaga.

Till att börja med kan man konstatera att om man normaliserar rörlängden mellan gasbehållaren och utsläppspunkten, L , med den inre rördiametern, d , så blir tryckfallet nästan oberoende av rördiametern. Detta illustreras i nedanstående figur där beräkningar för rör mellan 5 mm och 100 mm har genomförts och där blå linje är medelvärde för alla rördiametrar mellan dessa värden och denna omges av ett intervall som illustrerar spridningen för olika rördiametrar. Variationen beror på att rördiametern påverkar graden av turbulens i röret och därmed friktionskoefficienten. Variationen är dock relativt liten och inom felmarginalen för beräkningarna.



Figur 22. Tryckfall i ett rör som funktion av det normaliserade avståndet. Medelvärde för alla rördiametrar 5-100 mm i blått kompletterat med variationen inom detta intervall i felstaplarna. Beräkningen är utförd för 500 bar.

Om vi vidare undersöker hur trycket påverkar detta samband så får vi nedanstående diagram.



Figur 23. Tryckfall som funktion av antal normaliserade rördiametrar. Med ursprungstryck som parameter.

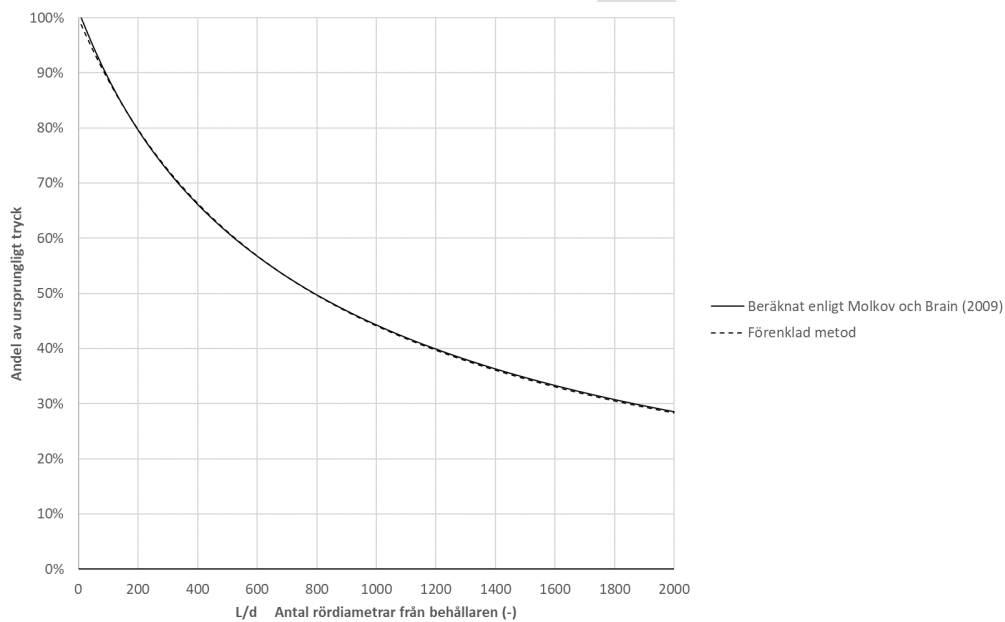
Som framgår ovan så finns det en viss påverkan av tryck där de lägsta och högsta trycken ger det största tryckfallet, men även denna är relativt begränsad. Genom att utgå från ett av de trycken med det minsta tryckfallet (dvs 350 eller 500 bar) så blir beräkningen svagt konservativ. I de fortsatta beräkningarna har 500 bar valts som tryck.

Nästa steg är att undersöka om ett förenklat uttryck kan beskriva sambandet mellan andel av ursprungstryck och antal rördiametrar från behållaren.

En regression av sambandet, kombinerad med ett förenklingssteg, gav nedanstående ekvation. I ekvationen är P trycket i utsläppspunkten, P_0 trycket i behållaren, L rörlängden och d är rördiametern

$$\frac{P}{P_0} = \frac{790}{790 + L/d} \quad (\text{ekv B. 1})$$

Denna jämförs med den exakta lösningen nedan.



Figur 24. Jämförelse mellan exakt lösning och förenklat uttryck enligt ekvation B.1.

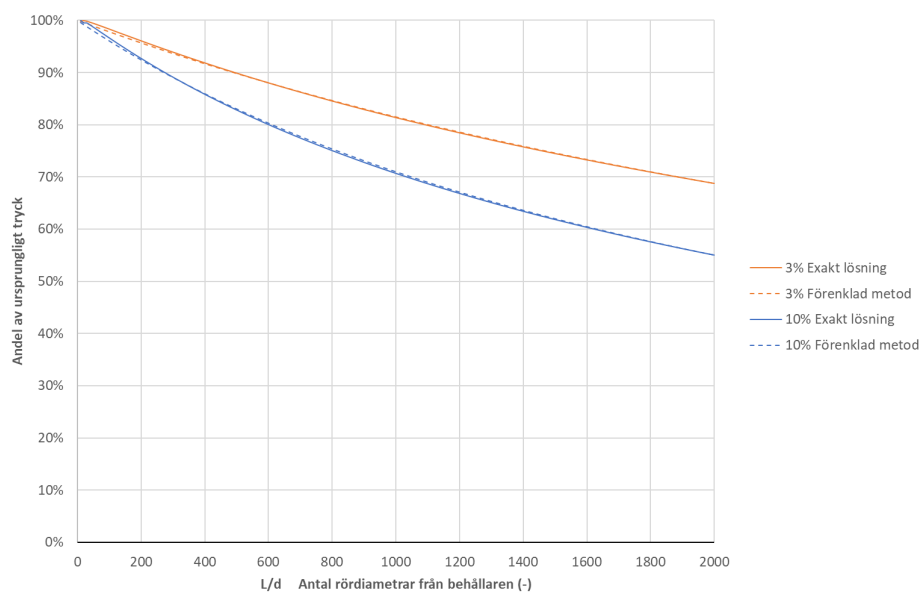
Som framgår så följer regressionen nästan perfekt den exakta lösningen.

Detta gäller för fullt rörbrott motsvarande beräkning har även genomförts för ett hål som motsvarar 3% och 10% av rörarean. En anpassning av ekvation B.1 medför nedanstående två ekvationer

$$\frac{P_{10\%}}{P_0} = \frac{2450}{2450 + L/d} \quad (\text{ekv B. 2})$$

$$\frac{P_{3\%}}{P_0} = \frac{4400}{4400 + L/d} \quad (\text{ekv B. 3})$$

Dessa plottade tillsammans med den exakta lösningen återfinns nedan.



Figur 25. Jämförelse mellan exakt lösning och förenklat uttryck för hål på 3% respektive 10% av rörarean enligt ekvation B.2 och B.3.



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

I samarbete med:



LUNDS
UNIVERSITET

