



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

FORSKNING

Säker vätgashantering i tätbebyggda områden



Säker vätgashantering i tätbebyggda områden

Tidsperiod: 2021–2023

Utförare: Avd. för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola

Ansvarig forskare: Marcus Runefors

Kort sammanfattning: Denna rapport utgör en kort sammanfattning av ett postdokprojekt finansierat av MSB gällande vätgashantering. Rapporten belyser hur säker vätgashantering kan verifieras samt en beskrivning av några säkerhetsåtgärder med särskilt fokus på skyddsavstånd och ventilation.

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

MSB:s kontaktperson:

Carina Fredström, 010-240 50 65,

Rickard Granevald, 010-240 56 15

Foto omslag: Bing Creative Commons

Produktion: Advant

Publikationsnummer: MSB2209 – oktober 2023

Tidigare utgiven: juni 2023

ISBN: 978-91-7927-403-0

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport. Författaren är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

Förord

Under de gångna två åren har jag haft förmånen att ytterligare fördjupa mig inom vätgassäkerhet inom ramen för ett postdokprojekt finansierat av MSB. Detta har sammanfallit med ett enormt intresse kring vätgas hos olika aktörer i samhället vilket har lett till att jag under denna period har hållit 42 presentationer om vätgassäkerhet i olika sammanhang.

Jag har under denna tid jobbat mycket nära mina kontaktpersoner på MSB, Carina Fredström och Rickard Granevald, i samband med att de har arbetat med att revidera MSB:s gashanteringsföreskrift (MSBFS 2020:1). Till denna reviderade föreskrift, som i skrivande stund är ute på förremiss, har jag bidragit med beräkningar avseende skyddsavstånd och ventilation.

Denna rapport utgör ett försök till kortfattad sammanfattning av projektet inom de ramar på cirka 10 sidor som MSB har ställt upp. Inne i rapporten finns hänvisningar till rapporter och artiklar där mer detaljer kring studierna kan återfinnas.

Nu fortsätter resan ännu djupare in i vätgassäkerhetens område inom en rad olika projekt som har initierats under postdokprojektets gång med allt från validering av CFD-modeller för vätgasexplosioner (i samarbete med DBI i Danmark) till skyddsavstånd för vätgaspipelines (tillsammans med bland annat LTU).

Jag kommer även att stötta Volvo Trucks AB i deras ambitioner att få en lastbil med vätgasdrift på vägarna inom bara ett par år.

Lund, 2023-06-15



Marcus Runefors

Universitetslektor, Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola

Innehåll

INTRODUKTION	5
Vätgasutbyggnaden i samhället	5
Vätgasens egenskaper och risker	5
Verifiering av tillräcklig säkerhetsnivå	6
Riskreducerande åtgärder	7
SÄRSKILT STUDERADE ÅTGÄRDER	10
Säkerhetsavstånd	10
Ventilation	12
Sprinklerkylning av gasbehållare	14
Tryckavlastning av behållare genom beskjutning	15
Ljuddetektion av vätgasutsläpp (pågående)	16
Barriärer för skydd mot vätgasjetflammar (pågående)	16
Inertering av vätgas med pyrotekniskt genererade aerosoler (pågående)	18
SLUTSATSER.....	19
REFERENSER	20

Introduktion

Detta kapitel beskriver kort utvecklingen av vätgasanvändningen i samhället samt vätgasens risker och egenskaper. Därefter följer en diskussion kring hur tillräcklig säkerhet kan verifieras och några exempel på relevanta riskreducerande åtgärder på olika nivåer.

Vätgasutbyggnaden i samhället

Det har väl knappast gått någon förbi att det finns mycket ambitiösa planer att bygga ut vätgasanvändningen i samhället. Mest medialt fokus har troligen varit på de stora industriella tillämpningarna där vätgas används som insatsråvara och då inte minst Hybritprojektet. Det finns även ett antal pågående och avslutade projekt där energi från förnybara energikällor som till exempel sol och vind avses lagras tills de behövs.

En annan viktig potentiell användning är för fordon och då särskilt fordon med så höga energibehov att det är svårt att använda batterier – till exempel lastbilar, tåg, flyg och fartyg. För att möjliggöra detta krävs också en betydande infrastruktur med vätgastankstationer som är under utveckling och snart kommer att driftsättas i ett högt tempo.

Hittills har tillämpningarna i Sverige uteslutande varit baserade på komprimerad gasformig vätgas (300–1 000 bar), men internationellt så har allt större fokus hamnat på flytande vätgas både för bulktransport och för användning i fartyg och flygplan.

Vätgasens egenskaper och risker

Som alla teknologier är vätgasanvändning behäftad med vissa risker och det är av stor betydelse att alla aktörer som arbetar med vätgas och designar systemen är väl förtrogna med dessa.

En av de mest kända egenskaperna är den låga densiteten som dock ofta felaktigt tas som intäkt för att hävda att vätgasen bara kommer att stiga uppåt och försvinna vid utsläpp. Det är emellertid så att de höga lagringstrycken gör att hastigheten vid ett eventuellt utsläpp blir så stor att stigkraften inte påverkar förrän vätgasen i normala fall har blandats med omgivande luft till under den nedre brännbarhetsgränsen (LFL, ”Lower Flammability Limit”). Det finns dock såklart fall där den låga densiteten är mycket fördelaktig och därför ska självklart denna fördel användas vid till exempel ventilation av ett utrymme.

Vätgasen är också känd för att vara väldigt reaktiv när den har blandats med luft då den har både en väldigt låg antändningsenergi och hög flamhastighet. Detta gör att situationer där vätgasen tillåts blanda sig med luft (till exempel under ett skärmtak) bör undvikas. Vätgas har också ett mycket brett brännbarhetsområde (4–78 %), men det bör noteras att den undre brännbarhetsgränsen är i nivå med normala kolväten. Det är också intressant att notera att antändning av vätgasblandningar strax över den nedre brännbarhetsgränsen (4–8 %) inte medför några säkerhetsmässiga implikationer utan koncentrationer upp till 8 % kan ofta tillåtas.

När det gäller lagring så innebär de höga lagringstrycken för gasformig vätgas stora mängder lagrad energi och dessutom är reaktiviteten så hög att även förbränningen av gasen bidrar till tryckvågen vid en tankruptur (vilket inte är fallet för till exempel metan). För flytande vätgas är många risker kopplade till den extremt låga temperaturen (-253°C) som till exempel kan kondensera syre, men det har även visat sig att den kondenserade vätgasen ofta spontanantänder vid kontakt med vatten.

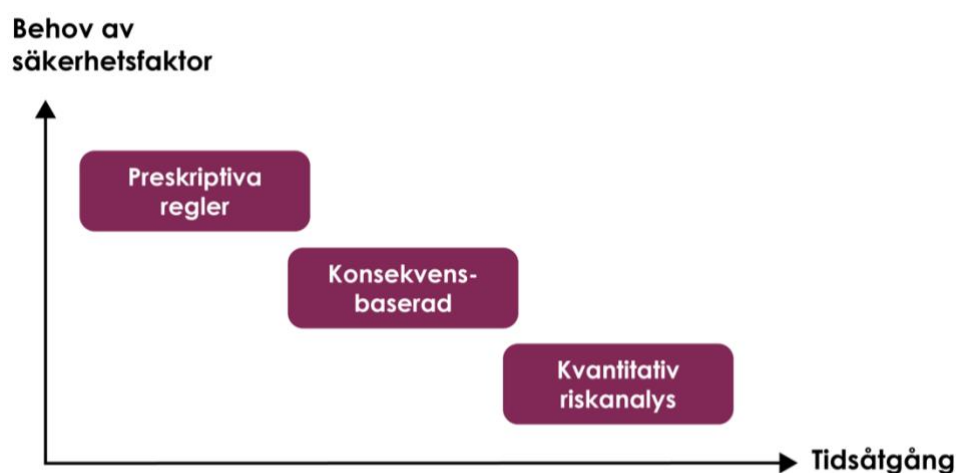
Verifiering av tillräcklig säkerhetsnivå

Verifiering av tillräcklig säkerhetsnivå kan ske på flera olika sätt vilket presenteras i figur 1. Sverige har en tradition av att göra en kvalitativ riskanalys (så kallad riskutredning) i samband med anläggningar med brännbar gas. Denna kombineras sedan med preskriptiva regler avseende till exempel avstånd och vissa utformningskrav (till exempel underlag) som regleras av MSBFS 2020:1 (MSB, 2020). En fördel med detta är att det är relativt tidseffektivt och enkelt, men å andra sidan gör det att eftersom åtgärderna ska leda till acceptabel säkerhet för alla anläggningar så krävs en betydande säkerhetsfaktor.

I många andra länder som till exempel Norge och Nederländerna baseras reglerna i stället på en kvantitativ riskanalys där verksamhetsutövaren ska visa att risknivån understiger ett visst givet värde. Utöver tidsåtgången och svårigheterna att göra det i ett tidigt skede är bristen på tillförlitlig data ett betydande problem. Inom projektet har därför ett samarbete inletts med flera andra länder inom International Energy Agency (IEA) där en dedikerad databas ska tas fram dit olyckor rapporteras (se Groth et al. 2023). Även ett examensarbete inom området har handletts – Fredriksson (2023).

Det finns även en verifieringsnivå mellan preskriptiva regler och kvantitativ riskanalys där så kallade ”dimensionerande skadefall” används för att visa att konsekvensen vid denna ”värsta troliga påverkan” är acceptabel. Fördelen med metoden är att den är enklare och kan göras tidigare i processen än en kvantitativ riskanalys, men nackleden är att valet av dimensionerande skadefall i någon mån är godtyckligt. Inom samma arbetsgrupp inom IEA som nämndes ovan finns en annan undergrupp som jobbar just kring detta där också arbete har lagts inom ramen för detta projekt (se Vyazmina, E. et al., 2023).

Figur 1. Tre sätt att verifiera tillräcklig säkerhetsnivå



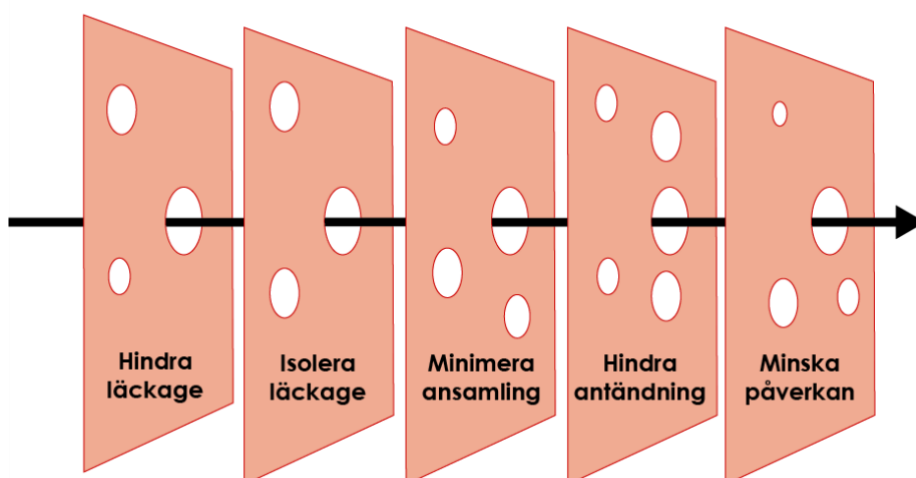
Utöver de mer långsiktiga samarbetena inom IEA som har beskrivits ovan så har metodiken i ovanstående figur applicerats på två områden inom vätgassäkerhet – skyddsavstånd och ventilation (se mer information i nästkommande kapitel). I båda fallen har ett eller flera dimensionerande skadefall definierats och antingen har etablerade modeller använts eller har nya tagits fram och validerats inom projektet. För att underlätta användningen så har även tabulerade avstånd och ventilationsstorlekar (det vill säga liknande preskriptiva regler) beräknats som kan användas så länge utformningen uppfyller definierade antaganden.

Resultatet från dessa båda studier ligger till grund för varsin bilaga till det förslag till reviderad MSBFS 2020:1 som i skrivande stund har skickats ut som förremiss.

Riskreducerande åtgärder

Inget säkerhetssystem är perfekt och därför behövs ofta flera nivåer av säkerhetsåtgärder vilket ofta illustreras med den så kallade ostmodellen nedan.

Figur 2. Förebyggande åtgärder i flera nivåer



En kort beskrivning av åtgärder på de olika nivåerna återfinns nedan.

Nivå 1 – Hindra läckage

Den bästa säkerhetsåtgärden är självklart att hindra utsläppet från att inträffa till att börja med och sannolikheten för en olycka kan minskas betydligt genom hög kvalitet i installationen och bra underhåll. Det är också viktigt att rätt material väljs i anläggningen och för vätgas innebär det särskilt att metalliska material ska vara beständiga mot väteförsprödning¹ vilket i de allra flesta fall behöver fastställas genom ett standardtest (till exempel enligt ISO 11114-4). Det kan även behövas fysiska skydd för påverkan både genom olyckor (till exempel påkörningsskydd) och avsiktlig åverkan (till exempel stängsel). Slutligen så kan även valet av minsta tekniskt möjliga rördimension vara en bra åtgärd eftersom riskavstånden normalt direkt hänger samman med rördimensionen – dubbelt så stor hålstorlek ger dubbelt så långt riskavstånd.

Tankrupturer² är en annan form av starthändelse och eftersom det är svårt att hitta effektiva skadebegränsande åtgärder är det viktigt att dessa förebyggs redan på denna nivå. Detta görs genom att undvika brännbart material i anslutning till behållaren och sedan ändå ha automatisk tryckavlastning vid behov. För stålbehållare, som går i ruptur på grund av förhöjt inre tryck när gasen värms upp, är säkerhetsventiler som aktiveras på tryck en bra lösning. Kompositbehållare går däremot i ruptur på grund av att materialets hållfasthet minskar vid temperaturpåverkan och inte på grund av förhöjt tryck (som vanligen bara ökar cirka 10 % innan ruptur). Detta gör att tryckaktiverade säkerhetsventiler inte fungerar utan det krävs någon form av temperaturaktivering, till exempel genom smältsäkring eller pneumatisk slang som brinner av. Behållarna behöver även skyddas mot fysisk påverkan.

Nivå 2 – Isolera läckage

Små läckage är vanligare på vätgasanläggningar än andra gasanläggningar på grund av vätgasmolekylens storlek. Detta, tillsammans med vätgasens höga reaktivitet, gör det extra angeläget att kunna isolera läckaget med en automatisk ventil, men det innebär i sin tur att utsläppet måste kunna detekteras på ett tillförlitligt sätt. Inomhus kan det göras med katalytiska vätgasdetektorer medan ljuddetektorer ofta behövs utomhus. Detta har delvis studerats inom projektet genom ett handlett examensarbete (Kuks et al., 2021) samt en pågående studie om ljuddetektion med maskininlärning, se nästa kapitel. Oavsett så krävs att anläggningen är försedd med lämpligt placerade isoleringsventiler som kan stänga av ett eventuellt läckage.

¹ **Väteförsprödning** är ett samlingsnamn för olika sätt som vätgasen kan tränga in och påverka materialets egenskaper så att det till exempel blir mer sprött eller får vätgasfyllda "blåsor".

² **Tankruptur** innebär att gasbehållaren momentant går sönder (till exempel på grund av för högt tryck eller minskad hållfasthet) och släpper ut sitt innehåll vilket leder till en snabb gasexpansion som normalt följs av ett eldklot när gasen förbränns.

Nivå 3 – Minimera ansamling

Att minimera ansamling utomhus hindras primärt genom att bara ha platta skärmtak utan sarg samt att hindra att utsläppt gas blir instängd mellan murar. Detta görs genom att inte ha fler sammanhängande murar än nödvändigt och begränsa deras höjd.

Inomhus är det svårare att undvika ansamling, men små läckage kan hanteras genom tillräcklig ventilation. Detta har studerats inom projektet, se nästa kapitel.

Nivå 4 – Hindra antändning

Risken för antändning minimeras genom att använda ATEX³-klassad utrustning i relevanta områden, men eftersom antändningsenergin är så låg kan antändning aldrig uteslutas. Under vissa förutsättningar kan även utsläpp spontanantända. Det är dock viktigt att inse att antändning inte heller kan garanteras (eftersom det kan vara positivt i vissa sammanhang) och därför måste designen klara båda utfallen.

Ett sätt att hindra antändning kan vara att inertera⁴ utrymmet innan en brännbar koncentration uppstår. Ett exempel kan vara pyrotekniskt genererade aerosoler vilket undersöks i ett pågående projekt som beskrivs i nästa kapitel.

Nivå 5 – Minska påverkan

Utomhus är den typiska konsekvensreducerande åtgärden att ha ett skyddsavstånd mellan kopplingar på gasanläggningen och olika skyddsmål. Detta har studerats inom projektet vilket diskuteras i nästkommande kapitel. Om avstånden från en koppling till gasflaskor understiger dessa så har sprinkler i vissa fall använts för att kyla gasflaskan vilket diskuteras i nästa kapitel. I vissa fall kan även tryckavlastning genom beskjutning vara motiverat vilket också presenteras i nästa kapitel.

Inomhus är tryckavlastning av utrymmet⁵ ofta nödvändigt och det bör noteras att de ekvationer som vanligen används för dimensionering av tryckavlastning (SS/EN 14994 eller NFPA 68) inte kan användas för vätgas på grund av för hög tryckstegringshastighet. Därför behöver därmed antingen en annan handberäkningsmetod (till exempel Molkov et al. 2015) eller CFD-modeller (till exempel FLACS eller ExSim) användas.

³ **ATEX** är en standard (EN 60079-10-1) som syftar till att minska risken för antändning av gasblandningar genom att ställa krav på särskilt provad elektronik samt begränsa vilka verktyg som används inom områden där brännbar gas kan finnas.

⁴ **Inertera** innebär att en gas, aerosol eller liknande släpps ut i utrymmet så att ett eventuellt utsläpp av brännbar gas inte kan antändas oavsett koncentration.

⁵ **Tryckavlastning** av utrymmet innebär att en lucka eller liknande öppnas automatiskt vid en explosion och på så sätt hindrar att trycket blir så stort att byggnaden skadas.

Särskilt studerade åtgärder

Vissa åtgärder har studerats mer i detalj under innevarande projekt och beskrivs i nedanstående kapitel. Där återfinns även en hänvisning till den/de publikationer där mer information kan återfinnas. Vissa studier är fortfarande pågående där annan finansiering används för att slutföra studierna.

Säkerhetsavstånd

Vid en etablering av en vätgasanläggning ställs ofta krav på vissa avstånd till människor och föremål i omgivningen. Dessa avser både att skydda vätgasanläggningen (främst gasbehållarna) från en brand i omgivningen och att ett läckage i en koppling eller annan olycka på anläggningen ska påverka omgivningen.

Figur 3. Säkerhetsavstånd ska skydda från en brand i omgivningen och en olycka på gasanläggningen



Som beskrivs i föregående kapitel så kan detta fastställas genom kvantitativ riskanalys, ”dimensionerande skadefall” eller tabulerade avstånd. Det angreppssätt som har valts i projektet är ”dimensionerande skadefall”⁶ där en läckagestorlek anges, vanligen som andel av rörarea eller rördiameter, som anses representera det värsta troliga fallet. Utifrån dessa har även tabulerade avstånd beräknats. En detaljerad beskrivning av metoden och resultaten återfinns i Runefors (2023), men sammanfattas kort nedan. Rapporten ligger även till grund för den revidering av MSBFS 2020:1 som är ute på förremiss för tillfället samt kommande riktlinjerna för vätgastankstationer H₂-TSA.

⁶ **Dimensionerande** skadefall innebär att ett scenario väljs som utgör en värsta troliga olycka. Detta används sedan för att utforma säkerhetsåtgärder som till exempel säkerhetsavstånd.

I det aktuella arbetet består de dimensionerande skadefallen av läckage på olika komponenter och kopplingar där tre olika storlekar på läckage har valts (som motsvarar 3 %, 10 % respektive 100 % av tvärsnittsarean). Mindre (och därmed mer frekventa) hål används som dimensionerande där konsekvensen är liten medan de större hålen används för mer allvarliga konsekvenser med potentiella dödsfall. Detta gör att det är möjligt att beakta aversionen för katastrofala fall genom att dimensionera avstånden (eller skyddssystem) så att inte ens det största möjliga hålet (100 %) ger katastrofala konsekvenser. Detta avstånd har historiskt inte setts som dimensionerande eftersom det inte är praktiskt möjligt att använda detta för alla avstånd. I metoden kan även automatiska isolerventiler⁷ användas för att reducera de dimensionerande hålstorlekarna eftersom de kommer att minska frekvensen av långvariga läckage på anläggningen.

Ett läckage i en koppling på anläggningen kan antingen antändas direkt vilket medför risker kopplade till höga gastemperaturer och värmestrålning eller antändas med viss fördröjning vilket orsakar risker kopplade till övertryck samt hög vätgaskoncentration (med risk för en så kallad flashfire). Även risken för att deflagrationen ska accelerera till en detonation⁸ beaktas. För människor gav höga gastemperaturer de längsta avstånden.

Skyddsobjekten bestod dels av människor (enstaka, folksamlingar eller utrymningsväg från samlingslokal) och byggnader (mycket svårutrymda eller byggnader i allmänhet). Dessutom ska eskalation förhindras genom avstånd till gasbehållare (som kan gå i ruptur) samt områden med mycket hinder (där detonation inte kan uteslutas).

Avstånd ska även finnas till byggnader, brännbart material, fordon och så vidare för att skydda från att en brand i dessa påverkar själva gasbehållarna. Beräkningar kring detta återfinns också i rapporten.

Vidare läsning

Runefors, M. (2023) "Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer"
MSB2186 – mars 2023, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB)

⁷ **Automatiska** isolerventiler är ventiler som stängs automatiskt vid detektion av ett utsläpp med till exempel vätgasdetektorer.

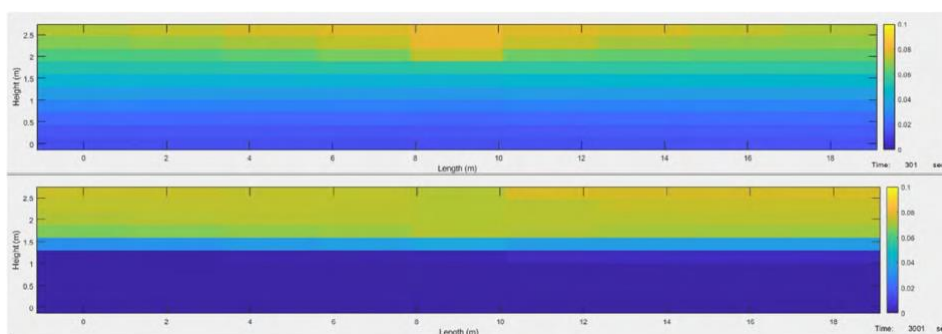
⁸ **Deflagration** är en förbränning med en hastighet under ljudhastigheten och som utomhus ofta ger små tryckökningar. Detonation innebär att förbränningsvägen har en hastighet över ljudhastigheten vilket kan ge mycket höga tryck även utomhus.

Ventilation

Som beskrivits tidigare i denna rapport är små läckage mer vanligt förekommande på vätgasanläggningar än andra gasanläggningar på grund av vätgasens lilla karaktäristiska molekylstorlek. Detta, tillsammans med de höga flamhastigheterna, gör att ventilationen spelar en ännu större roll än för andra brännbara gaser.

Inom projektet⁹ har därför en beräkningsmodell för ventilationsbehov tagits fram baserat på Multi-Zon-konceptet (Suzuki, 2004). MZ-konceptet liknar CFD-modeller genom att utrymmet delas upp i flera celler, men själva utsläppet modelleras i stället med en empirisk modell vilket gör att cellerna kan vara väsentligt större. Detta gör att beräkningstiden blir mycket kortare vilket innebär att ventilationsarean kan optimeras med rimlig beräkningstid. För beskrivning av själva metoden samt dess validering hänvisas till någon av publikationerna.

Figur 4. Vätgaskoncentration vid ett utsläpp från 0,1 mm² i ett rum på 18x6 meter med ventilation dimensionerad för en maximal koncentration på 8 %. Övre: 5 minuter, Nedre: 50 minuter

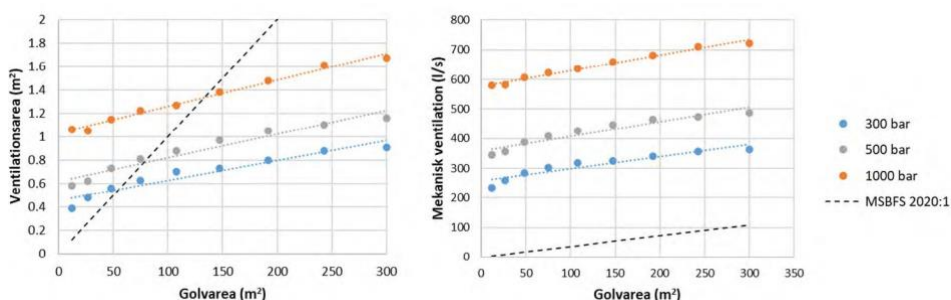


Modellen användes för att ta fram förslag på nya dimensioneringsflöden som ersätter kraven på 1 % av golvytan eller 0,5 omsättningar i nuvarande MSBFS 2020:1. Beräkningar genomfördes för tre olika tryck – 300, 500 och 1 000 bar – och för utrymmen mellan 6 och 300 m². Dimensionerande hålstorlek fastställdes i samråd med MSB till 0,1 mm². Eftersom ventilationsbehovet ökar med ett mer avlångt utrymme ansattes ett maximalt förhållande mellan kort- och långsida som 1:3. För andra fall kan framtagna modell¹⁰ eller annan motsvarande modell för att beräkna ventilationsbehovet. Resultaten framgår nedan där streckad linje motsvarar kraven i nuvarande MSBFS 2020:1 (som är oberoende av gas och tryck).

⁹ I detta avseende kompletterades även projektet med ett uppdrag från MSB för att kunna involvera Nils Johansson som är expert på den typ av beräkningsmodell som användes.

¹⁰ Programvaran återfinns här: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22726493.v1>.

Figur 5. Ventilationsarea (vänster) och flöde (höger) som gör att koncentrationen understiger 8 % vid ett läckage på 0,1 mm²



Resultaten visar att en linjär regression (färgade streckade linjer) relativt väl fångar behovet av ventilation även om det kan leda till en marginell överskattning vid mycket små eller stora utrymmen och en marginell underskattning där emellan. Linjerna motsvarar ekvationerna i nedanstående tabell som föreslås ligga till grund för nya regler i den reviderade versionen av MSBFS 2020:1.

Tabell 1. Enkel beräkningsmodell för erforderlig ventilationsarea och ventilationsflöde

Tryck, bar	Naturlig ventilation	Mekanisk ventilation	Tryck, bar
≤300	$0,458 \text{ m}^2 + 0,0017 \text{ m}^2 / \text{m}^2 \text{ golvarea}$	$257 \text{ l/s} + 0,41 \text{ l/s per m}^2 \text{ golvarea}$	≤ 300
301–500	$0,619 \text{ m}^2 + 0,0020 \text{ m}^2 / \text{m}^2 \text{ golvarea}$	$359 \text{ l/s} + 0,49 \text{ l/s per m}^2 \text{ golvarea}$	301–500
501–1 000	$1,031 \text{ m}^2 + 0,0023 \text{ m}^2 / \text{m}^2 \text{ golvarea}$	$578 \text{ l/s} + 0,52 \text{ l/s per m}^2 \text{ golvarea}$	501–1 000

Vidare läsning

Johansson, N. & Runefors, M., "MZ-gas: A multi-zone model for calculating hydrogen concentrations in an enclosure", <https://doi.org/10.5281/zenodo.8037661>

Runefors, M. & Johansson, N. (2023) "A Multi-Zone Model for Hydrogen Accumulation and Ventilation in Enclosures", Proceedings of the International Conference on Hydrogen Safety, September 19–21, Québec, Canada

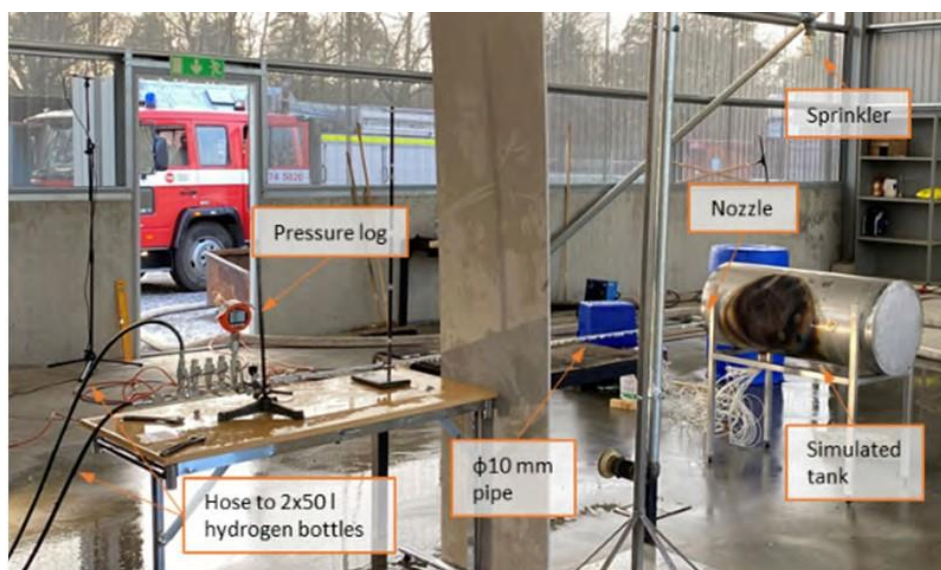
Runefors, M. & Johansson, N. (2023) "Parameterstudie av ventilationsbehov för vätgasinstallationer", Rapport 7055, Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola

Sprinklerkyllning av gasbehållare

På vissa vätgasanläggningar används sprinkler för att hindra tankruptur till följd av en vätgasetflamma på en komposittank. Eftersom det saknades experimentella bevis för att detta fungerade så genomfördes en serie försök inom projektet.

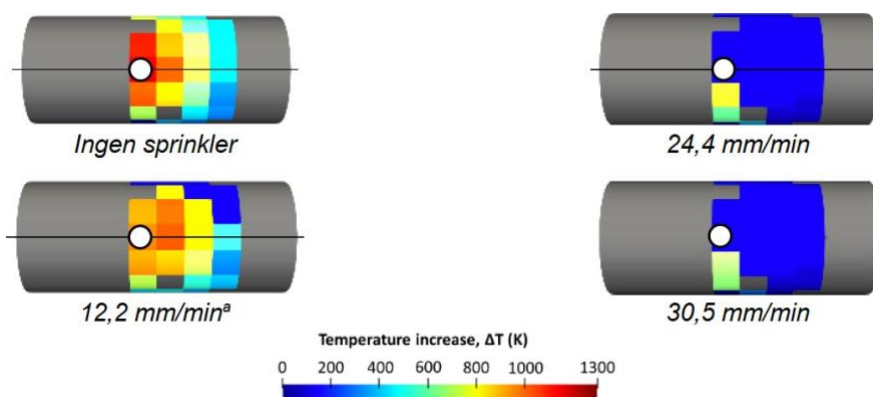
Försöket genomfördes med en simulerad tank utförd som ett plattermoelement (det vill säga stålplåt med temperaturmätning och bakomliggande keramisk isolering) som utsattes för en vätgasetflamma från ett hål på 0,6 millimeter och tryck på 50–176 bar.

Figur 6. Översikt över försöksuppställning för försök med sprinklerkyllning av vätgastank



Resultaten visade att tröghetsmomentet från den utsläppta gasen, kombinerat med den höga förbränningstemperaturen, gjorde det svårt att säkerställa tillräcklig kylning över hela ytan se nedanstående figur. Detta beror på att ingen vattenfilm kan bildas under träffpunkten för jetflamman.

Figur 7. Sprinklers påverkan på tanktemperaturen vid jetflammeexponering. Vit prick illustrerar ungefärlig träffpunkt för jetflamman



a) Notera att i detta försök hade sprinklerdysan annan placering än övriga försök. Se artikel.

Även med sprinklerkyllning var den lokala temperaturökningen fortfarande 600–1 000° C vilket en kompositbehållare bara klarar en mycket kort tid. Därför kan sprinkler inte användas för att hindra ruptur till följd av vätgasjetflamma på kompositbehållare. Förutom lokalt under träffpunkten minskar temperaturen dock kraftigt vilket gör att det skulle kunna vara en fungerande åtgärd för stålbehållare där ruptur huvudsakligen beror på en temperaturhöjning av gasen.

Vidare läsning

Runefors, M. & McNamee, R. (2022) "Influence of Sprinklers on the Thermal Exposure of a Tank Exposed to a Hydrogen Jet Flame", Proceedings of the 10th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, May 22–27, Oslo, Norway

Tryckavlastning av behållare genom beskjutning

I Sverige har räddningsskyttar använts under en längre tid för att vid behov göra gasbehållare trycklösa. Det vanligaste fallet har troligen varit acetylenflaskor vid industribränder för att säkerställa att ingen självuppvärmning sker, men i samband med två olyckor 2016 med CNG-fordon i Göteborg och Katrineholm framkom behov av att även kunna tryckavlasta fordonstankar i vissa fall.

Inga försök har genomförts inom detta projekt, men däremot har försök genomförda av dels MSB och dels RISE analyserats. Detaljerna kan utläsas ur nedanstående artiklar, men slutsatsen, när det gäller vätgasbehållare med ett driftryck på 700 bar, är att den typen av ammunition som är allmänt tillgänglig på den civila marknaden inte på ett tillförlitligt sätt kan tryckavlasta behållarna. Om taktiken vill användas bör man därför undersöka möjligheten att få tillgång till militär ammunition.

Vidare läsning

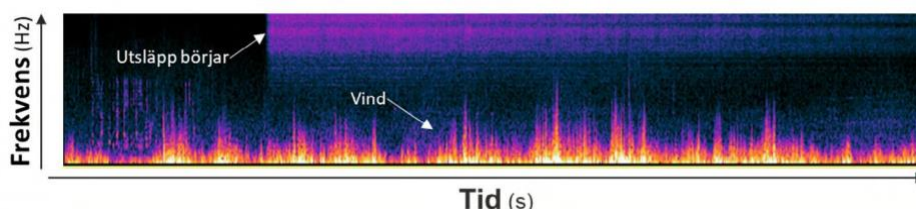
Gerhandler, J., Lönnermark, A., Runefors, M., Madsen, D. & Egardt, E. (2022) "Tactical Depressurization of Hydrogen Containers with Civilian Rifle and Ammunition", Proceedings of the 10th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, May 22–27, Oslo, Norway

Runefors, M. & Egardt, E. (2021) "Tactical Depressurization of Hydrogen and CNG Tanks using Rifles and other Projectiles", Proceedings from the International Conference on Hydrogen Safety, September 21–24, Online

Ljuddetektion av vätgasutsläpp (pågående)

När vätgas läcker ut genom ett hål eller koppling så alstrar de turbulenta rörelserna hos gasen tryckfluktuationer i luften som uppfattas som ljud. Intressant nog så kan även mycket små vätgasläckage (< 0,1 millimeter) lätt höras utan hjälpmedel.

Figur 8. Sprekrogram med utsläpp från en koppling motsvarande ett hål på 0,09 millimeter från 200 till 100 bar



Ovanstående läckage kunde utan problem höras 10–15 meter från utsläppskällan. Utöver att möjliggöra upptäckt av ett läckage med öronen så medger det även detektion med så kallade ultraljuddetektorer som är mycket användbara utomhus där klassiska punktdetektorer sällan ger tillräckligt skydd. Inom projektet har maskininlärning använts för att skilja bakgrundsljud från utsläpp, men eftersom ljudvågorna primärt är vid höga frekvenser där få störkällor finns så har det visat sig vara tillräckligt effektivt med enklare tröskelbaserade metoder för den typ av vanliga bakgrundsljud som har testats. I vissa fall kan dock kompressorer och roterande utrustning generera ljud med höga frekvenser och därför är avsikten att testa algoritmerna för mer utmanande störljud.

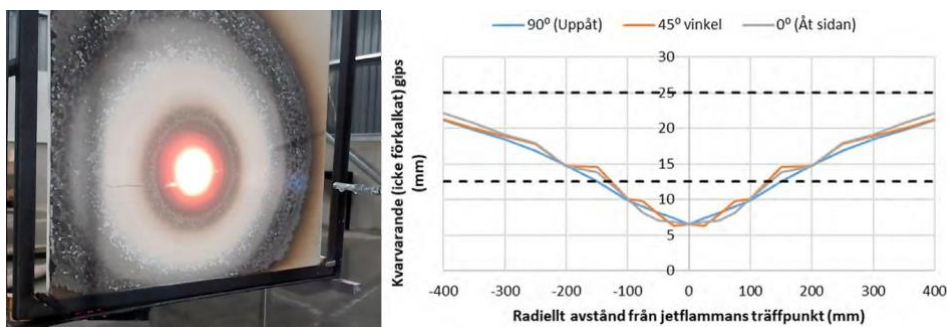
Barriärer för skydd mot vätgasjetflammar (pågående)

Temperaturpåverkan från en vätgasjetflamma skiljer sig markant från den som ligger till grund för klassning av byggnadsmaterial (ISO 834) vilket gör att det kan vara svårt att välja lämplig brandteknisk klass. Temperaturökningen är både snabbare och den maximala temperaturen är högre, men i många fall är påverkan mer kortvarig. Detta gör att vissa material i högre klass sannolikt kan vara sämre än andra material i lägre klass beroende på hur de reagerar mot temperaturchocken.

Förförsök har genomförts med gipsskivor inom ramen för projektet medan storskaliga försök med hålstorlekar liknande de som används som dimensionerande skadefall för tankstationer och med mer relevanta barriärmaterial kommer att genomföras inom kort.

Vid förförsöken exponerades två lager gipsskiva (2x12,5 millimeter) för en vätgasjetflamma under 9 minuter. Hålstorleken var 0,6 millimeter och trycket minskade successivt från 173 till 25 bar.

Figur 9. Vänster: Försök med gipsskiva exponerad för vätgasjetflamma. Höger: Kvarvarande (icke-förkalkad) tjocklek av de två gipsskivorna (streckade linjer). Kurvan är speglad vid X=0



Det kan vara relevant att jämföra förkalkningsdjupet¹¹ med förkalkningsdjupet vid normal brandpåverkan. Eftersom gipen får en mycket låg hållfasthet när den är förkalkad så kan helt förkalkad gipsskiva jämföras med ”failure time” enligt EN 1995-1-2. Enligt Just et al. (2010) inträffar en förkalkning på 20 millimeter (som är ungefär maximalt enligt ovan) efter cirka 20 minuter vilket är ungefär den dubbla tiden som den exponerades för vätgasjetflamman (9 minuter). Eftersom det rör sig om ett enstaka test så bör man vara försiktig med tolkningarna, men det visar tydligt att påverkan från en vätgasjetflamma är betydligt större än från en standardbrand. Det framgår också att påverkan minskar radiellt från träffpunkten även om större läckage på mindre avstånd kan ge en kall fläck i mitten där oförbränd vätgas träffar ytan. Det kan också konstateras att stigkraften i flammen inte påverkar exponeringen eftersom påverkan är samma oavsett riktning i figuren ovan.

I de planerade försöken, som genomförs i samarbete med Everfuel, kommer flera olika relevanta barriärmaterial testas. Jetflammen kommer att vara större (upp till cirka 6 meter) och kommer att hållas vid ett konstant tryck. Det möjliggör att barriären placeras på avståndet som ger den högsta påverkan vilket inte har varit möjligt i förförsöken. Försöken planeras till tidig höst 2023.

¹¹ När gips värms upp till cirka 100–120° C så drivs kristallvattnet ut och den tappar då nästan helt sin hållfasthet medan hållfastheten vid lägre temperaturer (det vill säga längre in i materialet) är i princip opåverkad.

Inertering av vätgas med pyrotekniskt genererade aerosoler (pågående)

Pyrotekniskt genererade aerosoler (PGA) är en produkt som idag främst används för att släcka bränder i elcentraler, men skulle också potentiellt kunna användas för att göra vätgasluftblandningar obrännbara innan de hinner ventileras ut. Tekniken är baserad på att mycket små partiklar ($\sim 1 \mu\text{m}$) av kaliumsalt som genereras genom pyroteknik.

Att använda kaliumsalter för att inertera vätgasblandningar har tidigare testats av van Wingerden et al. (2022) med slutsatsen att det inte är möjligt utan att blanda det med annan brännbar gas (till exempel propan). Detta kan dock bero på två saker, antingen var deras partiklar för stora ($\sim 10 \mu\text{m}$) för att hinna förångas i flamman eller så beror frånvaron av effekt på att kaliumsaltet visserligen är effektivt för att ta bort OH^- -radikalerna¹² (som är en avgörande för flamspridning i de flesta material), men bedöms ha mindre möjligheter att ta bort H^+ -radikalerna som är viktigt för just vätgasförbränning. Detta undersöks i en pågående studie där laserdiagnostik¹³ (Raman) används för att mäta flammans kemiska sammansättning vid olika inblandning av aerosoler. Studien beräknas vara klar kring sommaren 2023.

¹² Radikaler är mellansteg i förbränningen som är avgörande för att förbränningen ska kunna fortgå.

¹³ Laserdiagnostik är en typ av mätmetod där mätobjektet exponeras för en stark laser och därefter mäts den utsända strålningen från objektet. Detta kan användas för att till exempel fastställa koncentrationen av olika ämnen.

Slutsatser

Vätgas har beskrivits som en central del i den nödvändiga omställningen av samhället och verkar ha sin fördel gentemot batterilagring när stora energimängder behöver lagras. Grön vätgas är också en central del av omställningen av vissa industriella processer vid till exempel raffinaderier, konstgödseltillverkning och järn/stålbearbetning.

Vätgas som har blandats med luft är dock väldigt reaktivt och gasen lagras vid mycket höga tryck (eller låga temperaturer) vilket gör att säkerhetsfrågorna är naturligt kopplade till vätgasutbyggnaden. Eftersom den allmänna bilden, rätt eller fel, är att vätgas är relativt farligt så krävs det inte heller någon större händelse för att utbyggnaden ska stanna av. Detta illustrerades inte minst av vätgasolyckan på tankstationen i Sandvika 2019 som stängde alla vätgastankstationer i Norge under en lång tid. Det är därför viktigt både för säkerheten och för ostörd implementering i samhället att säkerhetsfrågorna får hög prioritet.

En annan faktor kopplat till säkerhetsfrågorna och implementeringen i samhället är den osäkerhet som bristen på tydliga riktlinjer för inte minst skyddsavstånd har inneburit för entreprenörerna. Förhoppningen är att de förslag på avstånd som har tagits fram inom ramen för detta projekt, och som planeras införas i MSBFS 2020:1, kan bidra med att minska denna osäkerhet utan att säkerhetsnivån i sig minskar.

Förhoppningen är att även övriga bidrag till vätgassäkerhetsforskningen som beskrivs i denna rapport ska kunna bidra till en säker och effektiv implementering av vätgas i samhället som en del i omställningen till minskat koldioxidutsläpp.

Referenser

- Groth, K.M., Al-Douri, A., Buttner, W., Dutta, K., Giannini, K., Hansen, P.M., Hartmann, K., Liu, Y., Markert, F., Njå, O., Quesnel, S., Runefors, M., Skjold, T., Tchouvelev, A.V., Tzioutzios D., Ustolin F., van Wingerden, K. (2023) “*Overview of International Activities in Hydrogen Systems Safety in IEA Hydrogen TCP Task 43*”, Proceedings of the International Conference on Hydrogen Safety, September 19–21, Québec, Canada.
- Just, A., Schmid, J. & König, J. (2010) ”*Gypsum plasterboards used as fire protection – Analysis of a database*”, SP rapport 2010:29.
- Kuhs, J. & Zubac, O. (2022) ”*Riskreducerande åtgärder för vätgasläckage*”, Rapport 5650, Examensarbete, Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- Molkov, V. & Bragin, M. (2015) ”*Hydrogen-air deflagrations: Vent sizing correlation for low-strength equipment and buildings*”, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, pp. 1256–1266.
- MSB (2020) “MSBFS 2020:1 Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om hantering av brandfarlig gas och brandfarliga aerosoler”, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, ISSN 2000-1886.
- Runefors, M. (2023) ”*Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer*”, MSB2186 – mars 2023, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB).
- Suzuki, K., Tanaka, T., Harada, K. & Yoshida, H. (2004) ”*An application of A Multilayer Zone Model to A Tunnel fire*”, Presenterad vid the 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Daegu, Korea.
- van Wingerden, M., Skjold, T., Roosendans, D., Dutertre, A. & Pekalski, A. (2022) “*The Effect of Solid Inhibitors on Hydrogen-air Combustion*”, Chemical Engineering Transactions, vol. 90, pp. 673–678.
- Vyazmina, E., de Reals, G., Chang, R., Phillips, L., Quesnel, S., Truchot, B., Hocquet, J., Torrado Beltran, D., Runefors, M. & Ehrhart, B. (2023) “*IEA TCP Task 43 – Subtask Safety Distance: State of The Art*”, Accepterad till the International Conference on Hydrogen Safety, September 19–21, Québec, Canada.



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

I samarbete med:



LUNDS UNIVERSITET

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)
651 81 Karlstad Tel 0771-240 240 www.msb.se
Publ.nr MSB2209 – oktober 2023 ISBN 978-91-7927-403-0