

Riskreducerande åtgärder för vätgasläckage

Jacob Kuhs & Oskar Zubac | Avdelningen för
Brandteknik | LTH | Lunds universitet



Riskreducerande åtgärder för vätgasläckage

**Jacob Kuhs
Oskar Zubac**

Lund 2022

Riskreducerande åtgärder för vätagasläckage | Risk reduction measures for hydrogen leakage

Jacob Kuhs, jacob.kuhs@gmail.com | Oskar Zubac, oskar.zubac1@gmail.com

Report 5650

ISRN: LUTVDG/TVBB--5650-SE

Antal sidor/Number of pages: 86

Keywords:

Hydrogen, Risk reduction measures, Risk mitigation, Gas leak detection, Leakage sound, Ultrasonic, Ultrasound, Gas leak detector, USGD, UGLD, Fire detection, Flame detector, Flame spectroscopy, Spectrum

Sökord:

Vätgas, Väte, Riskreducerande åtgärder, Riskbehandling, Läckagedetektion, Läckageljud, Ultraljud, Ljuddetektor, Branddetektion, Flamdetektor, Flamspektrum

Abstract:

Hydrogen use increase and so does the knowledge about its risks, but not necessarily about how to handle these risks. Limited literature is available about risk mitigation for hydrogen use, the objective of this thesis is to increase this knowledge.

Risk reduction measures that could be relevant for hydrogen leakage were reviewed and their potential for further assessment was qualitatively considered. Two risk reduction measures were chosen for deeper analysis: ultrasonic gas leak detection and flame detection. These measures' efficiencies were further studied through systematic literature search and practical experiments.

For ultrasonic gas leak detection, both literature and experiments indicate that hydrogen has properties and storage pressures that benefits detection. Ultrasonic detection of hydrogen leakage should be as good as, or better than, ultrasonic detection of other flammable gases.

For flame detection, results show that hydrogen flames emit radiation in fewer wavelengths than other, more common, flammable gases. Flame detection of hydrogen flames should be as good as flame detection of other flammable gases if specific wavelengths are analyzed.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2022

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Summary

Carbon dioxide emission is an increasing problem and a conversion to green and sustainable energy sources is highly prioritized. Hydrogen is an environmentally friendly energy carrier that can be produced from water in electrolysis driven by green energy. When hydrogen combusts, water is the only product.

Hydrogen use comes with risks due to the gas being explosive and easily ignited. There is limited knowledge about some parts of risk mitigation for hydrogen use, and the purpose of this thesis is therefore contributing to safer use of hydrogen by increasing the understanding of risk mitigation. This is achieved by reviewing risk reducing measures for gas leakage and investigating how applicable these risk reducing measures are for hydrogen.

By mapping the risk reduction measures for gas leakage, a simplified overview of their effectiveness in hydrogen use was developed. Most measures were found applicable for hydrogen use but deeper analyses are required to ascertain this. Two risk reduction measures were chosen for further analysis: ultrasonic gas leak detection and flame detection.

The further analyses were conducted with literature studies and practical experiments. The literature studies were done with a systematic approach by applying search words in a scientific article database. The practical experiments were conducted to investigate the detection possibilities using ultrasound and included visual observations of a hydrogen flame which was used in the analysis of flame detection.

The results from the literature study and the practical experiments for sound detection show that several variables affect sound pressure level from gas leakage, such as pressure, gas properties, and hole size. They also show that the characteristics of hydrogen and the usually higher storage pressure is beneficial for sound detection with ultrasound. For flame detection, the results show that hydrogen flames emit detectable radiation in fewer wavelengths than most other flammable gases. If the detector is made to specifically detect these wavelengths hydrogen flames can be detected.

The thesis concludes that detection of hydrogen leakage by using ultrasonic sound detectors should be equivalent to, or better than, sound detection of other flammable gases. For fire detectors, the thesis concludes that other flammable gases have a higher number of usable wavelengths for flame detection than hydrogen, but with the right detector detection potential is equivalent.

Sammanfattning

Koldioxidutsläpp utgör ett ökande problem för mänskligheten och omställningen till fossilfria och hållbara energikällor är av hög prioritet. En energibärare som är gynnsam för miljön är vätgas som kan skapas med grön energi genom spjälkning av vatten i elektrolysörer. När vätgasen sedan förbränns bildas endast vatten.

Vätgashantering innebär risker eftersom vätgas är explosivt och lättantändligt. Det finns begränsad kunskap kring riskbehandling av vätgas, genom att öka denna förståelse kan arbetet bidra till en säkrare vätgashantering. Arbetet uppnår detta genom att utreda vilka riskreducerande åtgärder som finns för läckage av brandfarliga gaser, samt hur applicerbara dessa är för vätgas.

Genom en kartläggning av riskreducerande åtgärder för gasläckage skapades en förenklad översikt över effektiviteten för dessa åtgärder vid vätgashantering. De flesta åtgärder bedöms vara applicerbara för vätgas men djupare analyser krävs för att kunna konstatera detta. Ur kartläggningen valdes åtgärderna ljuddetektion och flamdetektion för vidare analys.

De djupare analyserna genomfördes dels genom en litteraturstudie, dels genom laborationsförsök. Litteratursökningarna gjordes på ett systematiskt sätt med sökord i en databas för vetenskapliga artiklar. Laborationsförsöken genomfördes för att undersöka ultraljudsdetektmöjligheter för läckage av vätgas med hjälp av ljuddetektor och mikrofoner. Försöken inkluderade även en visuell observation av brinnande vätgas som användes i flamdetektionsanalysen.

Resultatet från litteraturstudien och laborationsförsöken för ljuddetektion visar att flera variabler påverkar ljudnivån från ett läckage, bland annat: tryck, gasens egenskaper och hålets storlek. Resultaten visar även att vätgasens egenskaper och det höga lagringstrycket gynnar detektion med ultraljud. För flamdetektion visar resultatet att vätgasflammar strålar i färre detektionsbara våglängder än många andra vanliga brandfarliga gaser men går att detektera med flamdetektorer anpassade för vätgas.

Arbetet konstaterar att detektion av vätgasläckage med ljuddetektorer bör fungera lika bra eller bättre än ljuddetektion av andra brandfarliga gaser. För flamdetektion konstaterar arbetet att andra brandfarliga gaser har fler möjliga våglängder för flamdetektion, men med rätt flamdetektorer kan vätgasflammar detekteras likvärdigt övriga brandfarliga gaser.

Förord

Denna rapport utgör det slutliga arbetet i utbildningen till brandingenjör samt civilingenjör i riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola. Under arbetets gång har flera personer hjälp till och stöttat i projektet. Vi skulle vilja ta tillfället i akt och rikta ett extra stort tack till följande personer:

Marcus Runefors för din handledning, kontakter med företag samt att du var med på laboration på helgdag trots missat barnkalas. Din goda handledning och expertis gav oss bra stöd i arbetet och en bra inriktning redan från början.

Robert McNamee för dina audiotekniska insatser samt tappra försök att laga utrustning som ena författaren vårdslöst ödelade.

Johan Baard Holth på Det-Tronics för lånet av ljuddetektor.

Ordlista

Ord	Engelska synonymer	Förklaring
Brandfarlig gas, brännbar gas	Flammable gas, combustible gas	Gas som kan antändas i luft vid 20 °C och atmosfärstryck.
Brännbarhetsområde, brännbarhetsgränser	Flammability limit	Ett intervall av bränsle-luftblandning som möjliggör antändning.
Bränslecell	Fuel cell	I en bränslecell omvandlas kemisk energi (ofta i vätgas) till elektrisk energi.
Sprinklersystem	Fire sprinkler system	Åtgärd som avger vatten vid aktivering, exempelvis sprinkler och vattendimma.
Deflagration-to-detonation transition (DDT)	–	En explosion övergår från deflagration till detonation.
Deflagration	–	En explosion med utbredning långsammare än ljudhastigheten.
Detonation	–	En explosion med utbredning snabbare än ljudhastigheten.
Diffusion	–	Spontan blandning av gaser.
Elektrolys	Electrolysis	I en elektrolys används elektrisk energi för att driva en icke-spontan kemisk reaktion.
Elektromagnetisk strålning, ljus	Electromagnetic radiation, light	Ljus är elektromagnetisk strålning som människor ser.
Explosion	–	Snabb frigörelse av energi som ger upphov till tryckvåg.
Frekvensspektrum, frekvensområde	Spectral density, power spectrum	Fördelningen av frekvenser och deras nivåer.
Grundhändelse, topphändelse, starthändelse	Top event, Hazardous event	Händelse som används som utgångspunkt i en riskanalys.
Inertering	Inerting	Förhindra antändning genom att tillsätta inert gas och sänka syrehalten.
Infrarött ljus, IR-ljus	Infrared light	Ljus med våglängder längre än människor kan uppfatta.
Jetflöde, jetstråle	Jet	En gas eller vätska som flödar med ett högre moment än omgivande medium.

Jetflamma	Jet flame	Ett jetflöde som har antänts.
Kolväte	Hydrocarbon	Kemisk förening som består av kol- och väteatomer.
Ljuddetektor, USGD, UGLD	Ultrasonic/-sound Gas (Leak) Detector	Detektor som detekterar ljudet av läckage.
Ljudnivå, ljudtrycksnivå, ljudamplitud	Sound Pressure Level (SPL)	Ljudnivån är den energi som avges från en ljudkälla och anges logaritmiskt
Ljudspektrum	Sound spectrum	Intervall med ljudfrekvenser.
Neuronnät (NN), artificiellt neuralt nätverk (ANN)	Artificial neural network	Sjävlärande algoritmer som tränas för att bättre utföra sin funktion.
Riskbehandling	Risk mitigation	Val och implementering av riskreducerande åtgärder.
Riskreducerande åtgärder, skyddssystem, barriärer, förebyggande åtgärder, säkerhetssystem	Risk reduction measures, barriers	Åtgärder som reducerar sannolikhet för att en händelse sker eller reducerar konsekvensen av en händelse.
Scenario, riskscenario	–	Oönskad händelse till följd av grundhändelse.
Spjälkning, klyvning	Chemical decomposition, Chemical breakdown	Delning av ett ämne till dess beståndsdelar.
Svartkroppsstrålning	Black body radiation	Elektromagnetiska strålning som alla objekt konstant avger. Beror på objektets temperatur.
Tryckavlastning, explosionsavlastning	Pressure relief vent	Avlastning av tryck som uppstår vid brand/explosion.
Ultraljud	Ultrasound, ultrasonic	Ljud vars frekvens överstiger människans hörsel.
Ultraviolettt ljus, UV-ljus	Ultraviolet light	Ljus med våglängder mindre än människor kan uppfatta.
Vätgas	Hydrogen	En molekyl bestående av två väteatomer.
Vätgashantering	–	Samlingsbegrepp för lagring, transport och användning av vätgas.

Innehållsförteckning

Summary.....	4
Sammanfattning.....	5
Förord.....	6
Ordlista.....	7
Innehållsförteckning.....	9
1 Inledning	12
1.1 Bakgrund.....	12
1.2 Syfte	13
1.3 Mål.....	13
1.4 Frågeställningar	13
1.5 Avgränsningar.....	14
1.6 Begränsningar.....	14
1.7 Disposition.....	15
2 Teori.....	16
2.1 Vätgas.....	16
2.2 Skadeverkan vid läckage av vätgas och andra brandfarliga gaser	17
2.3 Riskhanteringsprocessen	19
3 Metod.....	20
3.1 Riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser	20
3.1.1 Designlogik.....	20
3.2 Litteraturstudier för analys av selekterade riskreducerande åtgärder.....	22
3.2.1 Sökstrategi.....	22
3.2.2 Resultat från litteraturstudier.....	22
3.3 Laborationsförsök.....	23
4 Riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser.....	27
4.1 Klassificering av riskreducerande åtgärder utifrån designlogik.....	27
4.2 Läckagedetektion.....	29
4.2.1 Gasdetektion	29
4.2.2 Luktsättning.....	29
4.2.3 Ljuddetektion.....	30

4.3	Antändningsskydd.....	31
4.3.1	Begränsning av antändningskällor	31
4.3.2	Ventilation	31
4.3.3	Inertering	32
4.3.4	Hypoxic air-system.....	33
4.4	Branddetektion.....	33
4.4.1	Värmedetektion	33
4.4.2	Flamdetektion	34
4.5	Konsekvensreducering	35
4.5.1	Säkerhetsavstånd	35
4.5.2	Fysiska barriärer	35
4.5.3	Tryckavlastning.....	36
4.5.4	Sprinklersystem	37
4.6	Selektion av riskreducerande åtgärder	38
5	Ljuddetektion.....	39
5.1	Litteratursökning.....	39
5.2	Litteraturstudie.....	41
5.2.1	Ljud vid gasläckage.....	41
5.2.2	Ljuddetektorer	48
5.2.3	Skillnader mellan ljuddetektion av vätgas och övriga gaser.....	50
5.3	Laborationsförsök.....	52
5.4	Diskussion.....	60
6	Flamdetektion	62
6.1	Litteratursökning.....	62
6.2	Resultat av litteraturstudie	64
6.2.1	Ljus från flammor	64
6.2.2	Flamdetektorer.....	67
6.2.3	Flamdetektion av vätgas	70
6.3	Laborationsförsök.....	71
6.4	Diskussion.....	73
7	Felkällor	75

8	Slutsats	78
9	Framtida forskning.....	79
10	Referenser	80
	Bilaga – Laborationsmikrofoners kalibreringspektrogram.....	86

1 Inledning

I avsnittet presenteras bakgrunden till arbetet följt av syfte och mål, frågeställningar, avgränsningar och begränsningar samt arbetets disposition.

1.1 Bakgrund

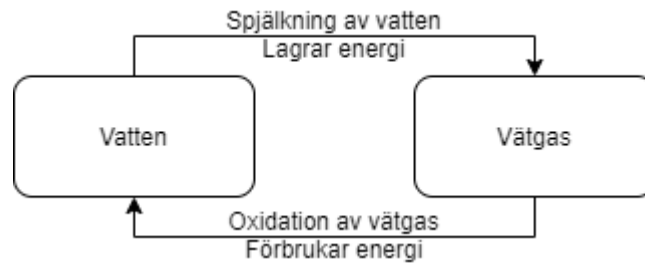
En av de största utmaningarna som mänskligheten står inför är att minska utsläppen av koldioxid och andra växthusgaser som starkt bidrar till den globala uppvärmningen. Utsläppen beror på det ökade energibehovet som den hastiga moderniseringen av vår värld under de senaste 200 åren inneburit. Energiförbehovet kommer sannolikt inte att minska, och därför är omställningen till fossilfria, förnybara och hållbara energikällor ett av de viktigaste problemen att lösa för mänskligheten.

Förnybara energikällor är ofta variabla och väderberoende (von Dalwigk m.fl., 2021), denna variation och ojämnheter är det huvudsakliga problemet i en övergång till 100 % förnybar energi (Dawood m.fl., 2020). Exempel på variabla energikällor är vindkraft och solenergi, vilket betyder att de producerar energi oberoende av aktuell energianvändning. När den producerade energin överstiger energiförbehovet behöver energin lagras. Ett hållbart sätt att lagra energin kan vara i form av vätgas (Dawood m.fl., 2020).

Tack vare möjligheterna som vätgas genererar finns ett stort intresse kring vätgas som energibärare med många stora projekt och mycket forskning inom ämnet. År 2020 gick EU-kommissionen ut med en satsning på vätgas ”A hydrogen strategy for climate-neutral Europe” med målsättningen att bland annat installera elektrolysörer för att producera stora mängder grön vätgas (European Commission, 2020) genom spjälkning av vatten. Satsningen omfattar 430 miljarder euro fram till år 2030 (Vätgas Sverige, 2020).

Spjälkning av vatten sker i en elektrolysprocess där vattnet delas upp i vätgas och syrgas. När energi sedan utvinns ur vätgas i exempelvis en bränslecell har den endast vatten som produkt, detta gör vätgas till en fördelaktig energibärare ur miljösynpunkt. Kretsloppet för spjälkning av vatten till vätgas illustreras i figur 1. Mouli-Castillo m.fl. (2021) beskriver att energin som lagras i vätgas har potential att kunna förvaras och transporteras enkelt samt omvandlas till både värme och elektricitet. Författarna beskriver även att energin i vätgas har möjlighet användas inom och överförs mellan flertalet energikrävande sektorer (exempelvis transport, industri, värme).

Vätgasen kan genom sina olika användningsområden enligt von Dalwigk m.fl. (2021) bidra till ett mer flexibelt och robust energisystem.



Figur 1 – Kretslopp för energilagring i vätgas genom spjälkning av vatten.

Användning av vätgas innebär inte bara fördelar, vid hantering av vätgas uppstår även flertalet risker som behöver hanteras för att uppnå säker hantering. Att säkerhet och risker är en viktig fråga för vätgashantering styrks av Dawood m.fl. (2020) som presenterar säkerhet som en central del i ett framtida vätgasbaserat energisystem. Detta styrks av Molkov (2012) som skriver att cirka 5–10 % av all finansiering för vätgasprojekt i USA och Europa avsätts till just säkerhetsaspekten.

Allteftersom vätgas blir en mer konventionell form av energilagring kommer det bli vanligare i sammanhang utanför industrier, exempelvis i fordon och bostadshus. Detta ställer krav på ökad säkerhet eftersom dessa vardagliga innehavare inte har samma kunskap kring vätgasens risker som industrier med kontinuerligt säkerhets- och riskhanteringsarbete (Molkov, 2012).

Riskhantering består både av riskbedömning och riskbehandling. Inom vätgashantering finns mycket forskning kring riskbedömning, se exempelvis Groth & Hecht (2017), Rigas & Sklavounos (2005) och K. Sun m.fl. (2014), medan forskning kring systematisk riskbehandling vid vätgashantering verkar vara mindre omfattande. Ett sätt att behandla risker är att implementera riskreducerande åtgärder. Genom en kartläggning av riskreducerande åtgärder för hantering av brandfarliga gaser och en analys av deras applicerbarhet på vätgas strävar arbetet till att bidra med ny kunskap kring säker hantering av vätgas.

1.2 Syfte

Arbetet syftar till att bidra till en säkrare hantering av vätgas och i förlängningen bidra till att vätgas kan ersätta fossila bränslen för en miljövänligare värld.

1.3 Mål

Målet med arbetet är att öka förståelsen för riskbehandling av vätgas genom att utreda riskreducerande åtgärder vid inträffat läckage av vätgas. En ökad förståelse av riskbehandlingen leder till säkrare hantering av vätgas.

1.4 Frågeställningar

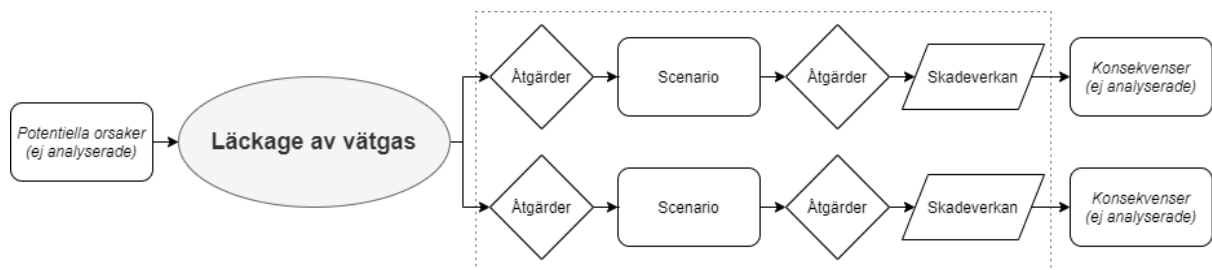
Arbetets syfte och mål konkretiseras i följande frågeställningar:

1. Vilka riskreducerande åtgärder kan användas vid läckage av brandfarliga gaser?
2. Vilka av de identifierade riskreducerande åtgärderna är utifrån vätgasens egenskaper och hanteringsförhållanden lämpliga för djupare analys?
3. Hur applicerbara är analyserade riskreducerande åtgärder för vätgasläckage?

1.5 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till hantering av vätgas i gasfas. Lagring och hantering av kylkondenserad vätgas i flytande fas hanteras inte i arbetet. Lagring i flytande fas innebär fler risker utöver de för gasfas, bland annat risker som beror på den låga lagringstemperaturen.

Arbetet avgränsas till åtgärder som har effekt efter att grundhändelsen ”inträffat läckage av vätgas” har skett. Andra händelser som kan leda till olyckor vid vätgashantering, exempelvis en extern brand, analyseras inte i arbetet. Vidare avgränsas arbetet till att behandla skadeverkan av ett scenario, konsekvenser analyseras inte eftersom arbetet ska kunna appliceras generellt och konsekvenserna varierar med anläggningars förutsättningar. Figur 2 illustrerar avgränsningarna.



Figur 2 – Schematisk modell med grundhändelse läckage av vätgas. Figuren visar i ungefärlig kronologisk ordning hur förloppet kan se ut vid en olyckshändelse. Potentiella orsaker leder till läckage som leder till konsekvenser. Arbetet avgränsas till riskreducerande åtgärder vid inträffat läckage.

Riskreducerande åtgärder som är integrerade i lagrings- och transportkomponenterna, exempelvis magnetventiler och rörbrottsventiler, inkluderas inte.

Riskreducerande åtgärders effekter på genomförande av eventuell räddningsinsats analyseras inte i arbetet. Åtgärder kan resultera i att räddningstjänsten larmas snabbare och/eller att olyckans förlopp saktas ner/avbryts och att räddningstjänsten därmed har bättre förutsättningar under insatsen.

1.6 Begränsningar

Tidsbegränsningen innebär att arbetets omfattning kontinuerligt behöver anpassas. Endast ett begränsat antal analyser av riskreducerande åtgärder kan genomföras med det djup som krävs för att uppnå tillräcklig kvalitet på arbetet.

Artiklar som inte går att erhålla gratis med hjälp av universitetets tillgångar används inte i arbetet på grund av ekonomiska skäl.

I arbetet används icke-kvalitetsgranskade källor som komplement i de fall litteraturstudier resulterar i få inkluderade kvalitetsgranskade artiklar.

1.7 Disposition

Arbetet utgörs av följande avsnitt:

Avsnitt 1 – Inledning

I avsnittet presenteras bakgrunden till arbetet följt av syfte och mål, frågeställningar, avgränsningar och begränsningar samt arbetets disposition.

Avsnitt 2 – Teori

I avsnittet beskrivs de fysikaliska egenskaperna för vätgas och hur dessa skiljer sig åt från andra brandfarliga gaser. Därefter beskrivs skadeverkan vid läckage av vätgas och andra brandfarliga gaser. Slutligen beskrivs riskhanteringsprocessen.

Avsnitt 3 – Metod

I avsnittet beskrivs de metoder som har använts i arbetet.

Avsnitt 4 – Riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser

I avsnittet presenteras en kartläggning av riskreducerande åtgärder som kan användas för brandfarliga gaser och som anses vara inom avgränsningarna. Avsnittet diskuterar även åtgärdernas applicerbarhet på vätgas. I avsnittet selekteras även två riskreducerande åtgärder för djupare analys. Selektionen sker med motiveringar utifrån teori och kartläggning.

Avsnitt 5 – Ljuddetektion

I avsnittet presenteras den djupare analysen av den riskreducerande åtgärden ljuddetektion. Inledningsvis presenteras processen för litteratursökningen följt av litteraturstudiens resultat. Därefter presenteras resultatet från laborationsförsöken som genomfördes och slutligen en diskussion kring resultaten.

Avsnitt 6 – Flamdetektion

I avsnittet presenteras den djupare analysen av den riskreducerande åtgärden flamdetektion. Inledningsvis presenteras processen för litteratursökningen följt av litteraturstudiens resultat. Därefter presenteras ett kort resultat från laborationsförsöken och slutligen en diskussion kring resultatet.

Avsnitt 7 – Felkällor

I avsnittet presenteras felkällor som kan ha påverkat arbetet.

Avsnitt 8 – Slutsats

I avsnittet presenteras de slutsatser som erhållits med utgångspunkt i arbetets frågeställningar

Avsnitt 9 – Framtida forskning

I avsnittet presenteras möjligheter till fortsatt arbete inom riskbehandling för vätgashantering.

2 Teori

I avsnittet beskrivs de fysikaliska egenskaperna för vätgas och hur dessa skiljer sig åt från andra brandfarliga gaser. Därefter beskrivs skadeverkan vid läckage av vätgas och andra brandfarliga gaser. Slutligen beskrivs riskhanteringsprocessen.

2.1 Vätgas

Väte är den lättaste och minsta atomen i det periodiska systemet och består i sin vanligaste isotop av endast en proton och en elektron. Väteatomer förekommer sällan i naturen; vätgas är den vanliga formen av rent väte eftersom väteatomerna är starkt reaktiva och snabbt bildar molekyler. Vätgas består av två väteatomer och har den kemiska beteckningen H_2 . Vätgas kan framställas på flera olika sätt, den klassiska metoden är att frigöra väte från kolväten genom så kallad reformering vilket är en kostnadseffektiv men icke miljövänlig metod som används mycket inom industrin (Dawood m.fl., 2020). Vätgas kan även framställas genom spjälkning av vatten vilket är en emissionsfri process.

Vätgas har precis som övriga brandfarliga gaser risker. Gasen är osynlig och luktfri, dessutom är flammen ofta osynlig när gasen brinner (Molkov, 2012). Vätgasens fysikaliska egenskaper skiljer sig från andra brandfarliga gaser, i tabell 1 görs en jämförelse av några relevanta egenskaper mellan vätgas och andra brandfarliga gaser.

Tabell 1 – Olika brandfarliga gasers relevanta fysikaliska egenskaper (Dybr, 2001; MSB, u.å.)

Brandfarlig gas	Relativ densitet (Luft=1)	Brännbarhetsområde (Volymprocent)	Antändningsenergi (mj)	Kokpunkt (°C)
Vätgas	0,1	4–75	0,002	-253
Acetylen	0,9	2–82	0,03	-84
Ammoniak	0,6	15–28	-	-33
Butan	2,1	1,9–8,5	-	-1
Metan	0,6	4,4–16,5	0,33	-162
Propan	1,5	2,3–9,5	0,31	-42

Vätgas har en väldigt låg relativ densitet vilket innebär att gasen stiger snabbt vid ett läckage samt snabbt späds ut i luften. Gasen har även en hög diffusionskoefficient, vilket innebär att den snabbt blandas ut i andra gaser (Mostinsky, 2006). Vätgas har till följd av att den är en liten molekyl med låg densitet och hög diffusivitet även en förmåga att läcka i till synes täta behållare (Almgren, 2007).

Vätgasens energiinnehåll per volymenhet är lågt, men högt per viktenhet. För att lagra större mängder vätgas i rimliga volymer, och därmed uppnå högre energikoncentration, krävs ett högre lagringstryck jämfört med andra gaser. Högre tryck innebär större risker vid hantering. Vätgas som lagras under högre tryck lagras vanligtvis i högtryckstankar under 300 – 750 bars tryck (Hua m.fl., 2011). Lagring sker även vid ännu högre tryck, i högtryckstankar som används vid tankstationer för vätgasdrivna fordon lagras vätgasen under upp till 900 bars tryck (Cenex, 2021).

Tabell 1 illustrerar även att vätgas har ett väldigt stort brännbarhetsområde jämfört med de andra gaserna, endast acetylen har ett större intervall. Brännbarhetsområdet visar vid vilka koncentrationer i en gas-luftblandning som antändning kan ske – ett större brännbarhetsområde innebär ökad risk för antändning. Vätgas har även en väldigt liten antändningsenergi vilket innebär att en liten extern energi är tillräcklig för att antända vätgasen efter ett läckage.

Vätgas är väldigt explosivt vilket speglas i SEK handbok 426 (Svensk Elstandard, 2019) som placerar vätgas i explosionsgrupp IIC vilken är den mest kritiska gruppen av explosiva ämnen. Ett läckage av vätgas kan innebära att vätgasen självantänder även utan extern antändningskälla (Cha m.fl., 2021).

2.2 Skadeverkan vid läckage av vätgas och andra brandfarliga gaser

I avsnittet presenteras skadeverkan vid läckage av vätgas och andra brandfarliga gaser.

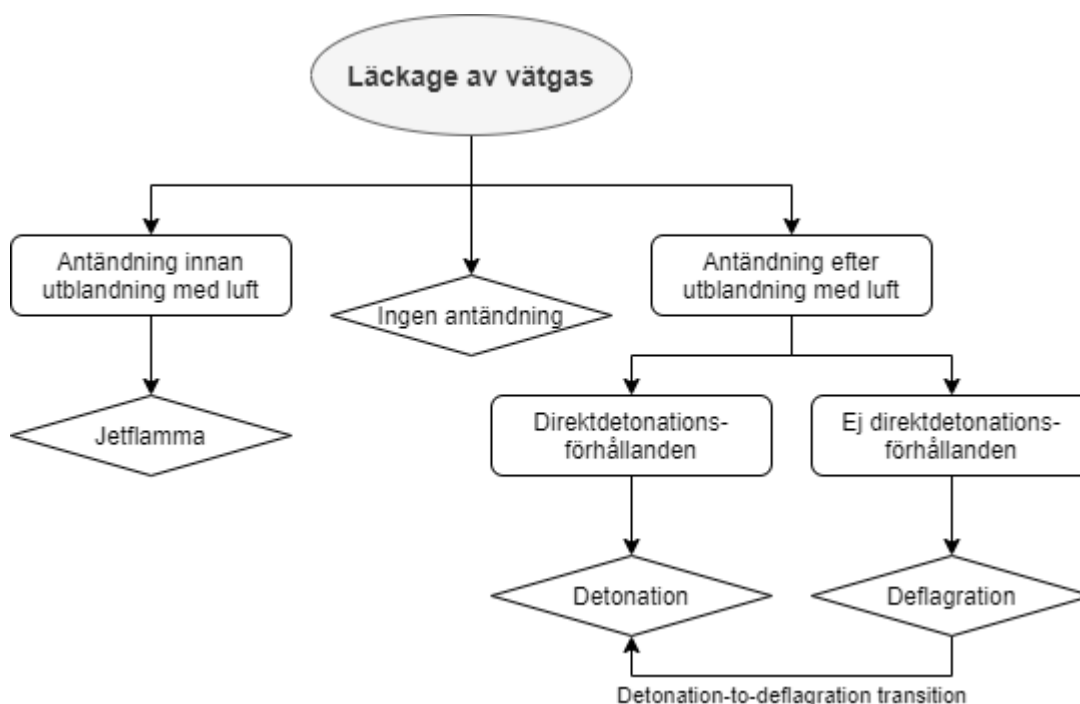
Om antändning sker innan gasen blandats ut med luft kan antingen en jetflamma eller ett eldklot uppstå. Jetflamman uppstår när en jetström antänds och kräver en kontinuerlig tillförsel av bränsle för att fortlöpa (Molkov, 2012). En jetström bildas när flödet från ett läckage är tillräckligt kraftigt för att bilda en stråle, resultatet blir en flamma som brinner i riktning av läckaget. Förbränningen sker där gasen möter luften: en diffusionsflamma. Jetflamman storlek beror på läckagets styrka, vid högre tryck eller större hål kan flammen bli längre och/eller större.

Ett eldklot uppstår när ett gasmoln antänds innan det har blandats ut med luft – resultatet blir ett gasmoln som brinner där det möter luften. Större eldklot uppstår vid exempelvis tankruptur när stora mängder oblandad vätgas kan antända, vid läckage späds vätgasen snabbt ut i luften vilket förhindrar större eldklot (Xie m.fl., 2021).

Om antändning sker efter att gasen blandats ut med luft kan antingen en deflagration eller en detonation ske. En deflagration är en explosion där flamfronten understiger ljudhastigheten, medan en detonation är en explosion där flamfronten har en hastighet som överstiger ljudhastigheten och skapar en kraftfull tryckvåg. Enligt Molkov (2012) kan direkt detonation av vätgas ske, dock är det ovanligt. För att direkt detonation ska ske behöver bland annat koncentrationen vätgas i en luftblandning ligga inom detonationsgränserna. Dessa gränser är ingen fysikalisk egenskap utan har visat sig variera med storleken på experimentförsöken där gränserna testats (Molkov, 2012). En konservativ uppskattning utifrån den data som finns från sådana försök är enligt Molkov att detonationsområdet för vätgas i luft är 11–70 %. För att direkt detonation ska ske behöver även antändningskällan avge så mycket energi att den skapar en tryckvåg (Guirao m.fl., 1989).

En detonation kan även ske genom att en deflagration övergår till en detonation, detta fenomen kallas deflagration-to-detonation transition och är den vanligaste detonationsorsaken för vätgas (Molkov, 2012). Molkov beskriver även att vätgas är mer benägen att övergå från deflagration till detonation än de flesta andra brandfarliga gaserna. Enligt Guirao m.fl. (1989) är de vanligaste orsakerna till denna övergång turbulens och interaktioner mellan tryckvågor som ökar flamfrontens hastighet, antändningskällan har ingen betydelse för övergången.

I figur 3 sammanfattas de scenarier som beskrivits och i tabell 2 presenteras deras primära skadeverkan.



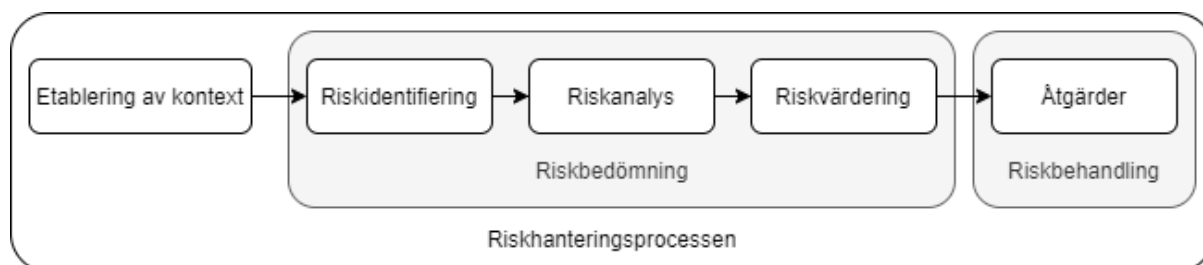
Figur 3 – Läckage av vätgas kan leda till 4 olika scenarier beroende på tid till antändning och vätekoncentrationen.

Tabell 2 – Scenarier och deras skadeverkan.

Scenario	Skadeverkan
Jetflamma	Värmestrålning
Deflagration	Tryckverkan och viss värmestrålning
Detonation	Kraftfull tryckverkan

2.3 Riskhanteringsprocessen

Riskhanteringsprocessen innebär arbetet från att etablera kontext och identifiera, analysera och värdera relevanta risker, till att implementera och underhålla åtgärder som syftar till att hantera de identifierade riskerna. I figur 4 illustreras riskhanteringsprocessen enligt ISO-standard 31000:2018, en vägledning som syftar till att systematisera riskhanteringsarbetet (ISO, 2018).

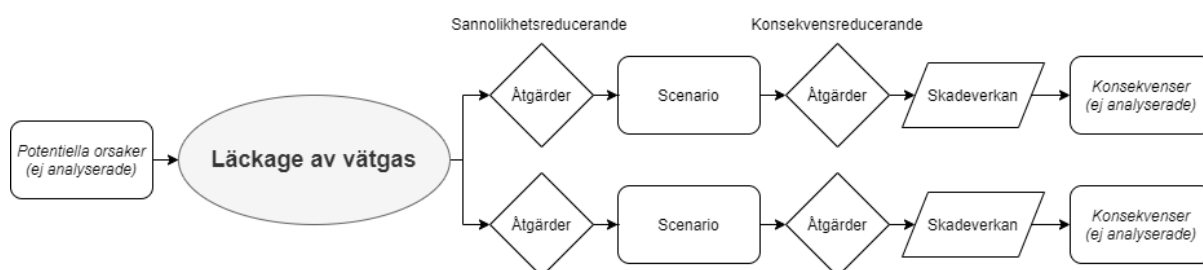


Figur 4 – Riskhanteringsprocessen enligt ISO-modellen.

Riskbehandlingen syftar till att välja ut och implementera de åtgärder som på bästa sätt hanterar risken, där bästa sätt motiveras med en kombination av flera faktorer, bland annat sannolikhets- och konsekvensreducerande effekter samt genomförbarhet och ekonomisk kostnad.

Riskreducerande åtgärder kan vara både sannolikhets- och konsekvensreducerande.

Sannolikhetsreducering innebär att minska sannolikheten för att ett visst scenario ska ske, medan konsekvensreducering innebär att minimera skadeverkan och därmed konsekvenserna av scenariot. I den schematiska modellen som används i rapporten är sannolikhetsreducerande åtgärder placerade till vänster om scenarierna och konsekvensreducerande till höger, se figur 5.



Figur 5 – Schematisk modell med grundhändelse läckage av vätgas. Arbetet avgränsas till riskreducerande åtgärder vid inträffat läckage.

3 Metod

I avsnittet beskrivs de metoder som har använts för att genomföra arbetet. Författarna rekommenderar att respektive metod läses i samband med motsvarande avsnitt.

3.1 Riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser

Här beskrivs metoden för avsnitt 4.

För att få en djupare förståelse av de riskreducerande åtgärder som kan användas vid hantering av brandfarliga gaser genomfördes en kartläggning av riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser.

Initialt gjordes en övergripande identifiering av riskreducerande åtgärder med hjälp av litteratur om brandfarliga gaser från framför allt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) samt kurslitteratur från brandingenjörsutbildningen. Med litteraturen och tidigare kunskaper från brandingenjörsutbildningen som utgångspunkt identifierades riskreducerande åtgärder som passar inom avgränsningarna.

Kartläggningen av de identifierade riskreducerande åtgärderna genomfördes med en mindre litteraturstudie för varje åtgärd. Litteraturstudierna syftade till att svara på hur och varför åtgärden fungerar, samt om regelverk ställer krav på åtgärden. I de fall information hittades om hur åtgärderna praktiskt utformas utan att gå in på tekniska detaljer presenterades även detta. Avslutningsvis diskuterades åtgärdernas eventuella applicerbarhet på vätgas utifrån den teori som presenterades i avsnitt 2.

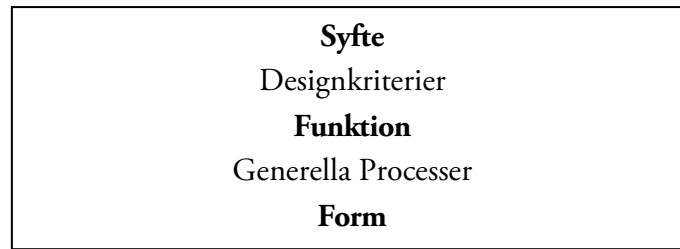
Avsnitt 4 strukturerades utifrån designlogiken, där de riskreducerande åtgärderna kategoriserades inom fyra huvudsyften som på olika sätt påverkar utfallet av ett inträffat läckage.

3.1.1 Designlogik

Designlogik är ett generellt ramverk baserat på Rasmussens (1985) modell för nivåer av abstraktion, och används för att förstå och konstruera system genom att se dem som artefakter som är skapade för specifika syften (Brehmer, 2013). En bra artefakt är en som uppfyller sitt syfte. Modellen kan appliceras på tekniska system där de tekniska lösningarna utformas för att på bästa sätt uppfylla syftet.

Designlogiken kan delas upp i flera hierarkiska steg där de högre nivåerna syftar till att svara på varför artefakten finns, och de lägre nivåerna på hur artefakten ska uppfylla detta syfte.

Abstraktionsnivån i beskrivningen av artefakten är inledningsvis hög och sjunker allteftersom designlogiken beskriver hur, snarare än varför, artefakten ska uppfylla syftet. Modellen har tre huvudnivåer: *Syfte*, *Funktion* och *Form*. Schemat kan fyllas ut med två ytterligare nivåer: *Designkriterier* mellan *Syfte* och *Funktion*, samt *Generella Processer* mellan *Funktion* och *Form*. Se figur 6 för den fullständiga modellen.



Figur 6 – Designlogikens fem hierarkiska nivåer med de tre huvudsakliga.

Syftesnivån förklarar varför artefakten ska finnas. Designkriterierna beskriver på vilket sätt syftet ska uppnås. Funktion beskriver vad artefakten måste kunna göra för att syftet och designkriterierna ska uppfyllas. Generella processer syftar till att använda redan beprövad erfarenhet och vetenskap för att underlätta i bestämmandet av formen. Den sista nivån, form, beskriver hur artefakten ska formas så att det som bestämts på tidigare nivåer kan uppfyllas.

För att illustrera hur designlogiken kan användas exemplifieras den med hjälp av en brandvarnare på de tre huvudnivåerna, se tabell 3. En bra artefakt är en som uppfyller sitt syfte: brandvarnarens syfte är att informera personer i bostaden om att det pågår en brand. Brandvarnarens funktion är att kunna detektera en brand samt avge signaler som informerar personerna om branden. Branddetektionens form kan ske på olika sätt, till exempel med optisk eller joniserande rökdetektion, formen beskriver hur brandvarnaren ska utformas för att detektera branden. Formen avgör dessutom hur signalerna ska informera personerna, för brandvarnare sker det oftast med hjälp av ljudsignaler från högtalare.

Tabell 3 – Utformning av brandvarnare med hjälp av designlogik.

Hierarkisk nivå	Brandvarnarexempel
Syfte	Informera personer att brand pågår
Funktion	Detektera brand samt avge signaler
Form	Optisk sensor samt högtalare

3.2 Litteraturstudier för analys av selekterade riskreducerande åtgärder

Här beskrivs metoden för litteraturstudierna i avsnitt 5 och 6.

Litteraturstudier genomfördes med hjälp av Scopus databas för varje selekterad åtgärd. Scopus är en databas från förlaget Elsevier som samlar vetenskapliga artiklar. En systematisk sökstrategi med sökord och urvalskriterier användes för att ta fram relevanta artiklar. Efter urvalet genomfördes en granskning av referenser (eng. snowballing) för att hitta ytterligare relevant litteratur.

3.2.1 Sökstrategi

I litteraturstudien genomfördes sökningar i Scopus databas med kombinationer av sökord, sökord innebär ord som måste finnas i titel, abstract och/eller artikelns nyckelord (eng. keywords). Sökorden bestämdes i prioritetsordning utifrån vad som ansågs bidra mest till relevanta sökträffar. Sökord adderades fram till dess att antalet sökträffar ansågs vara hanterbart utan att missa för många relevanta artiklar. I de fall sökningen innehöll många icke-relevanta sökträffar användes "AND NOT"-logik för att utesluta dessa. Från sökresultatet uteslöts artiklar med hjälp av urvalskriterier som presenteras i respektive riskreducerande åtgärds avsnitt.

Sökningen skedde i följande ordning (se avsnitt 5.1 och 6.1):

1. Sökning i Scopus databas med kombinationer av sökord.
2. Uteslutning av artiklar på annat språk än engelska.
3. Uteslutning av artiklar utifrån deras titel och abstract med hjälp av urvalskriterier.
4. Uteslutning av artiklar där fullständig artikel inte kunde hittas
5. Uteslutning av artiklar utifrån hela artikelns innehåll med hjälp av urvalskriterier.
6. Granskning av referenser (eng. snowballing) i de utvalda artiklarna genom applicering av urvalskriterier.

3.2.2 Resultat från litteraturstudier

De inkluderade artiklarna från sökstrategin analyserades vilket gav en kunskapsbas i respektive selekterad riskreducerande åtgärd. Därefter presenterades utifrån artiklarna hur åtgärden fungerar, åtgärdens för- och nackdelar samt hur applicerbar den är vid vätgashantering. Genom att använda flera källor som diskuterar liknande åsikter eller presenterar samma resultat förstärktes trovärdigheten. I första hand användes kvalitetsgranskade (eng. peer-review) artiklar men även icke-kvalitetsgranskade artiklar användes med försiktighet för att komplettera de kvalitetsgranskade artiklarna.

3.3 Laborationsförsök

Här beskrivs metoden för avsnitt 5.3.

I arbetet genomfördes laborationsförsök för de riskreducerande åtgärderna som selekterades. Laborationsförsöken för ljuddetektion bestod av två delar som genomfördes parallellt med varandra: den första delen bestod av ljudinspelning av ett läckage med hjälp av mikrofoner och den andra delen bestod av att detektionsavstånd undersöktes med en kommersiell ljuddetektor. Läckage med tre olika hålstorlekar genomfördes: två var läckage genom munstycken med olika hålstorlek och det tredje var ett mindre läckage som slumpmässigt uppstod i försöksriggen vid anslutningen till vätgasflaskan. Det bestämdes på plats att detta slumpmässigt skapade läckage skulle användas eftersom det ansågs vara en unik möjlighet att analysera ljudet från ett verkligt läckage.

Försökens mål var att utreda hur variationer i läckagets tryck, hålstorlek och vinkel påverkar möjligheten till detektion. Dessa variabler bedömdes vara av intresse utifrån litteraturstudien för ljuddetektion (avsnitt 5.2). Ljudinspelningarna syftade till att analysera hur läckagets ljudnivå påverkas av variationerna, medan tester av ljuddetektorn gick ut på att undersöka hur detektorns detektionsavstånd påverkas.

Utrustning som användes i försöken presenteras i tabell 4.

Tabell 4 – Utrustning som användes i försöken.

Utrustning	Typ
Flaskor med vätgas (3 st)	2 st flaskor på 50 liter med 200 bars tryck. 1 st flaska på 50 liter med 50 bars tryck
Försöksrigg med ventiler	-
Manometer	-
Munstycke	Två munstycken med olika storlek på öppning
Videokameror (2 st)	-
Mikrofoner med stativ (3 st)	2 st Earthworks Audio <i>M30</i> . 1 st Earthworks Audio <i>M23</i>
Förstärkare	<i>Zoom LiveTrak L-12</i>
Lasermätare	-
Ljuddetektor	Det-Tronics <i>FlexSonic Acoustic Detector</i> , se figur 8
Avståndsmarkeringar	-
Måttband	-
Värmekamera	FLIR <i>E60</i>
Tändare	-

Försöksriggen placerades så att läckagen alltid skedde på samma plats. En mobilkamera filmade manometern under alla försök för att möjliggöra tryckavläsning vid alla tidpunkter. Avståndsmarkeringarna började vid utsläppspunkten och utgick i 45° vinkel från munstycket. Vid varje metersmarkering på måttbandet placerades en avståndsmarkering. Se försöksuppställning i figur 7.



Figur 7 – Försöksuppställning. Mikrofoner markerade med blått, utsläppspunkt markerat i orange. På marken syns avståndsmarkeringar. Mikrofonerna är skyddade av plastpåsar som togs av innan försök. Mikrofonerna är från vänster placerade på 90°, 45° och 0° vinkel från utsläppet.

Runt munstycket placerades tre mikrofoner på 5 meters avstånd vid samma höjd som läckaget men med olika vinkel i förhållande till läckaget. De två M30-modellerna placerades med 90° respektive 45° vinkel från läckaget och M23-modellen placerades rakt framför läckaget (0° vinkel). Se bilaga för mikrofonernas frekvenskurvor. Mikrofonerna kopplades till en förstärkare som spelade in ljudet. Se figur 7 för uppställning av mikrofonerna i förhållande till utsläppspunkt.

Ljuddetektorn som användes i försöken är Det-Tronics *FlexSonic Acoustic Detector*. Ljuddetektorn var inställd på att indikera utsläpp med ljudnivåer över 59 dB i ultraljudsfrekvenser. I försöken transporterades ljuddetektorn för hand mot utsläppet längs med avståndsmarkeringarna för att bedöma detektionsavståndet. Figur 8 visar ljuddetektorn samt de avståndsmarkeringar som användes för att bedöma detektionsavstånd.



Figur 8 – Vänster: Ljuddetektorn som användes i försöken (Det-Tronics FlexSonic Acoustic Detector). Höger: Avståndsmarkeringarna som användes för att bedöma detektionsavstånden.

Läckagens effektiva hålstorlek beräknades med beräkningsmodell från Karlsruher Institut für Technologie (u.å.) genom att jämföra tryckavläsning vid olika tidpunkter från försöken mot ett teoretiskt läckage för att ta fram motsvarande area. De tre hålstorlekarna beräknades till diametrarna 0,09 mm (slumpmässigt uppstått läckage) samt 1,2 mm och 1,3 mm (munstycken).

Det genomfördes 6 försök som beskrivs nedan, sammanställning av försöken presenteras även i tabell 5.

Tabell 5 – Sammanställning av försökens håldiameter och försökstryck.

Försök	Håldiameter	Starttryck	Sluttryck	Kommentar
1	1,3 mm	50	3 bar	Ljuddetektor och ljudinspelning
2	0,09 mm	200 bar	100 bar	Ljuddetektor och ljudinspelning
3	0,09 mm	100 bar	10 bar	Ljudinspelning
4	1,2 mm	200 bar	20 bar	Ljuddetektor och ljudinspelning
5	–			Bakgrundsljud
6	1,2 mm	100 bar	15 bar	Jetflamma

Försök 1 genomfördes med 50 bars tryck och munstycke med hålstorlek 1,3 mm. Mikrofonerna spelade in läckageljudet under hela utsläppet och detektionsavstånd uppmättes med avståndsmarkeringar och videokamera.

Försök 2 genomfördes med 200 bars tryck. I detta försök analyserades det verkliga läckaget som uppstod i försöksriggen med hålstorlek 0,09 mm. Flaskan placerades ovanför nollpunkten och mikrofonernas höjd modifierades. När flaskan öppnades förblev ventilen på försöksriggen stängd och därmed tilläts inget flöde ut från munstycket. Eftersom läckaget var litet sjönk trycket långsamt, utsläppet stoppades vid 100 bar och hade då varat i över en timme. På grund av det långsamma utsläppsförloppet genomfördes flera test av detektionsavstånd med ljuddetektorn vid olika tryck. Mikrofonerna spelade in läckageljud under hela utsläppet och det genomfördes detektionsavståndsmätningar runt 170 bar, 150 bar, 125 bar och 100 bar.

Under försök 2 analyserades även detektionsavståndet för detektorn vid olika vinklar i förhållande till läckage. Detektorn förflyttades till dess att avståndet för larm och avlarm hittades, detta upprepades vid flera vinklar. Detta genomfördes vid trycket 120 bar.

Försök 3 genomfördes med 100 bars tryck och verkligt läckage, hålstorlek 0,09 mm. I detta försök trycksattes försöksriggen med stängd ventil. Efter att försöksriggen trycksatts stängdes tillflödet från flaskan och trycket sjönk hastigt från 100 bar. I detta försök spelades enbart ljudet in med mikrofonerna, inga detektionsavståndsmätningar genomfördes.

Försök 4 genomfördes med 200 bars tryck och munstycke med hålstorlek 1,2 mm (mikrofonernas höjd modifierades igen). I detta försök spelades ljud in och mätningar av detektionsavstånd genomfördes.

Försök 5 utgjordes av inspelning av bakgrundsljud med mikrofoner. Bakgrundsljudet spelades in i 15 minuter och medelvärde beräknades.

Försök 6 genomfördes med 100 bars tryck och munstycke med hålstorlek 1,2 mm. I försöket skapades en jetflamma som betraktades visuellt och med värmekamera under utsläppet. Flaskan som hade använts i försök 2 som nu hade 100 bars tryck kopplades på försöksriggen. Ventilen öppnades och en tändare användes för att tända eld på utsläppet vid munstycket.

4 Riskreducerande åtgärder för brandfarliga gaser

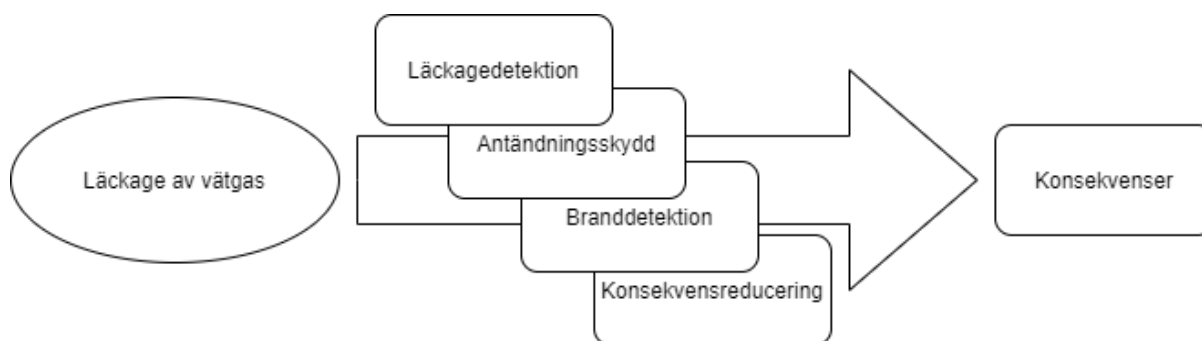
I avsnittet presenteras en kartläggning av riskreducerande åtgärder som kan användas för brandfarliga gaser och som anses vara inom avgränsningarna. Fler riskreducerande åtgärder kan finnas som ej har identifierats i arbetet. Metoden som använts för kartläggningen presenteras i avsnitt 3.1.

I avsnittet diskuteras åtgärdernas applicerbarhet på vätgas och vad en djupare analys av åtgärden kan undersöka. Diskussionen bygger både på teorin från avsnitt 2 och den kunskap som erhållits från kartläggningen av de riskreducerande åtgärderna.

Slutligen selekteras två av åtgärderna för djupare analys i avsnittet.

4.1 Klassificering av riskreducerande åtgärder utifrån designlogik

De riskreducerande åtgärder som presenteras har utifrån designlogiken delats upp i fyra olika syften som verkar i olika delar av händelseförloppet, se figur 9. De syften som bestämts är: läckagedetektion, antändningsskydd, branddetektion och konsekvensreducering. Samtliga åtgärder som beskrivs i avsnittet har kunnat kategoriseras i något av dessa fyra syften. Varje syfte har ett eget avsnitt med rubriker för respektive åtgärd – där förklaras åtgärdens funktion och en beskrivning ges av hur åtgärden kan formas för att reducera risken vid hantering av brandfarliga gaser. Slutligen diskuteras åtgärdens applicerbarhet på vätgas utifrån vätgasens egenskaper som presenterats i avsnitt 2.

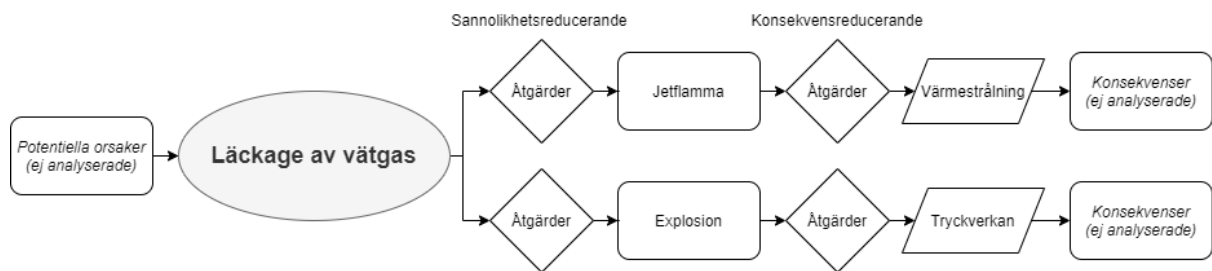


Figur 9 – Riskreducerande åtgärder i kronologisk ordning. Läckagedetektion, antändningsskydd, branddetektion, konsekvensreducering.

Åtgärderna vars syfte är läckagedetektion respektive antändningsskydd är sannolikhetsreducerande åtgärder. Dessa åtgärder förhindrar att jetflamma eller explosion inträffar vilket är att föredra framför att scenariot inträffar med reducerade konsekvenser. Genom att implementera sannolikhetsreducerande åtgärder kan ett läckage av vätgas ske relativt skadefritt, där de enda skadorna blir skadade komponenter och spill av vätgasen.

Åtgärder med syfte branddetektion och konsekvensreducering är konsekvensreducerande åtgärder. Dessa åtgärder syftar till att reducera konsekvenserna av ett scenario istället för att förhindra scenariot helt.

I figur 10 presenteras de scenarier och konsekvenser som identifierats utifrån avgränsningarna.



Figur 10 – Schematisk modell med grundhändelse läckage av vätgas. Analyserade scenarier och deras skadeverkan är nu bestämda. Explosion innebär deflagration eller detonation.

I tabell 6 presenteras de kartlagda riskreducerande åtgärderna samt deras riskreducerande karaktär och syfte.

Tabell 6 – Kartlagda åtgärders riskreducerande karaktär och syfte. X markerar effekt.

Riskreducerande åtgärd	Sannolikhetsreducerande		Konsekvensreducerande	
	Läckage-detektion	Antändnings-skydd	Branddetektion	Konsekvens-reducering
Gasdetektion	X			
Luktsättning	X			
Ljuddetektion	X			
Begränsning av antändningskällor		X		
Ventilation		X		
Inertering		X		
Hypoxic air		X		
Värmedetektion			X	
Flamdetektion			X	
Säkerhetsavstånd				X
Fysiska barriärer				X
Tryckavlastning				X
Sprinkler och vattendimma				X

4.2 Läckagedetektion

För att förhindra att brandfarlig gas antänds behöver ett läckage upptäckas i ett tidigt skede. Detektionen i sig själv reducerar inte risken, men genom att ge en tidig varning och på så sätt ge förutsättningar att genomföra andra åtgärder reduceras risken indirekt. Ett exempel på indirekt verkan är att detektion automatiskt kan leda till att en magnetventil stängs som förhindrar fortsatt läckage av den brandfarliga gasen.

I AFS 2020:1 krävställer Arbetsmiljöverket (2020) detektorer för att förhindra olyckor och akut ohälsa på grund av bland annat brand, gasutströmning och syrebrist. Vilka detektorer som ska användas specificeras inte. I underrubrikerna presenteras gasdetektion, luktsättning och ljuddetektion, som är tre olika sätt som identifierats för att detektera läckage.

4.2.1 Gasdetektion

Gasdetektorer kan detektera läckage innan gasblandningen når brännbarhetsområdet – genom tidig detektion av gas kan således sannolikheten för antändning reduceras genom implementering av antändningsskydd. En vanlig metod för gasdetektion av brännbara gaser är katalytisk förbränning, som bygger på att gasen som når detektorn förbränns på ett uppvärmt katalytiskt element (Deimer, 2000; Thomas, u.å.). Deimer menar att metoden bara är användbar under brännbarhetsgränsen eftersom syrekoncentrationen sjunker när undre brännbarhetsgränsen passeras och fullständig oxidering kan inte ske. En annan gasdetektionsmetod för brännbara gaser är infraröda sensorer som kräver att gasen bryter strålningen mellan en sändare och mottagare av IR-strålning (Thomas, u.å.).

Katalytiska gasdetektorer är punktdetektorer (Naranjo, 2009) vilket innebär att detektion förutsätter att gasen når detektorn. Punktdetektionen kan gynnas av vätgasens låga densitet, men den höga diffusiviteten skulle kunna leda till att gasen snabbt blandas ut med luften i utrymmet. Om vätgasen hinner blandas ut kan gasdetektorn först detektera vätgasen när koncentrationen av vätgas i hela utrymmet ökar. En detektor placerad högt i utrymmet borde ha bäst förutsättningar för detektion av vätgasläckage eftersom gasen stiger snabbt. Lagringsutrymmets form och dimensioner, främst takhöjd, bör spela stor roll för gasdetektorers applicerbarhet och kan vid djupare analys undersökas vidare.

4.2.2 Luktsättning

Ett sätt att detektera brandfarliga gaser är att få människor att uppfatta gasen. Genom att tillsätta ämnen som luktar starkt vid små koncentrationer kan människor reagera vid läckage av gaser som är både osynliga och luktfria. Vid luktsättning av brandfarliga gaser kan människor förnimma lukten långt under brännbarhetsområdet (MSB, 2020a). Luktsättning av gas sker oftast med tillsats av tetrahydrotiofen, dimetylsulfid, eller merkaptaner såsom etylmerkaptan (Norén & Thunell, 2002).

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2009) ställer i MSBFS 2009:7 krav på luktsättning av naturgas så att människor med normalt luktsinne kan uppfatta gasen vid 20 procent av undre brännbarhetsgränsen.

Luktsättning skiljer sig från övrig läckagedetektion eftersom åtgärden förutsätter att en människa exponeras för gasen och på så sätt känner de tillsatta luktämnen. Vätgas blandas snabbt ut i luften och metoden borde därför detektera utsläppet under liknande förhållanden som gasdetektion (dock vid andra koncentrationer). Eftersom vätgas lagras under mycket höga tryck kan ett eventuellt utsläpp även upptäckas av människor via ljud eller andra övervakningssystem. Av dessa anledningar borde luktsättning fungera som en kompletterande detekteringsmetod när det är extra viktigt att identifiera läckage, men som primär detekteringsmetod påverkas den mycket negativt av vätgasens densitet.

Luktsättning kan påverka bränslecellers funktion negativt eftersom många luktsättningsämnen förgiftar bränslecellen (Fink, 2016) vilket innebär att luktsättning bedöms vara en mindre lämplig riskreducerande åtgärd. Vid en djupare analys kan detektionsnivåer av luktsatt vätgas jämföras med gasdetektion och eventuell möjlighet till detektion utan förgiftning av bränsleceller undersökas.

4.2.3 Ljuddetektion

Detektion av ljudet som avges vid ett läckage är ett annat sätt att detektera läckage av brandfarliga gaser. Ljuddetektorer som används för att detektera läckage verkar ofta inom ultraljudsspektrum (Naranjo, 2009). Detektion med ljuddetektor kräver inte att gasen transporteras från läckan till detektorn, istället är det ljudet som behöver nå detektorn vilket innebär att detektion kan ske snabbt. Ljuddetektorer påverkas inte av vind eller ventilation som blåser gasen bort från detektorn (MSA, 2012) vilket reducerar risken för oupptäckt läckage.

Naranjo (2009) menar att ultraljudsdetektorer kan detektera läckage av vätgas under höga tryck. På grund av vätgasens låga densitet borde ljudet som avges vid läckage bli mer högfrekvent än andra brandfarliga gaser, på samma sätt som rösten blir ljusare vid inandning av helium, detta kan innebära att vätgas avger mer ljud i ultraljudsfrekvenser. Vid en djupare analys kan det undersökas om vätgasens egenskaper och hanteringsförhållanden påverkar detektionsmöjligheterna.

4.3 Antändningsskydd

Genom att förhindra antändning genom antändningsskydd kan scenarierna som beskrivits undvikas. I avsnittet presenteras fyra sätt som identifierats för att förhindra antändning: begränsning av tändkällor, ventilation, inertering och hypoxic air-system.

4.3.1 Begränsning av antändningskällor

För att antända en brandfarlig gas krävs en utblandning med luft (antingen i hela eller delar av gasmolnet) samt en antändningsenergi som startar den exoterma reaktionen. För brandfarliga gaser är den krävda antändningsenergin mycket låg, ofta under 0,5 mJ (Dyhr, 2001). Tändkällor kan vara öppna lågor eller elektricitet (både statisk och från felande utrustning) (Molkov, 2012).

Genom att begränsa antändningskällor vid hantering av brandfarliga gaser kan antändning av utsläppt gas undvikas. EU-direktiv kallade ATEX-direktiven ställer krav på utrustning och skyddssystem i explosiva miljöer (European Commission, 2021), vilket i Sverige kravställs i SRVFS 2000:7 (Statens räddningsverk, 2004) och AFS 2016:4 (Arbetsmiljöverket, 2016). Föreskrifterna ställer krav på indelning i olika zoner baserat på risknivå, dessa zoner ställer i sin tur krav på att utrustning och skyddssystem ska vara utformade efter utrustningskategorier som innehåller krav på potentiella antändningskällor.

Begränsning av tändkällor förhindrar antändning genom att förbjuda tändkällor där brännbar miljö kan uppkomma. Eftersom vätgas har en mycket låg antändningsenergi, 0,002 mJ, ställs mycket höga krav på begränsningen av tändkällor. Vid för låga krav på antändningskällorna eller missar vid inspektionen av vätgashantering kan en eventuell antändning fördröjas istället för att förhindras, vilket skulle kunna leda till en explosion istället för jetflamma. Vätgas riskerar att självantända vid utsläpp, beroende på när detta händer kan en begränsning av tändkällor vara mindre effektivt. Antändning kan även ske till följd av statisk urladdning vilket skulle kunna ske lättare i en vätgas-luftblandning än i vanlig luft. En djupare analys kan undersöka om det är möjligt att utforma lagringsförhållanden med krav på antändningsenergi under 0,002 mJ och om det samtidigt är möjligt att reducera risken för eventuell självantändning av vätgasen.

4.3.2 Ventilation

Ventilation av brandfarliga gaser är ett sätt att minska sannolikheten för antändning och därmed reducera risken vid hantering av brandfarliga gaser. Genom att ventilera ut gaserna kan koncentrationen hållas utanför brännbarhetsområdet och förhindra antändning vid mindre läckage.

Denna funktion medför att ventilation förekommer i så gott som alla standarder och föreskrifter för hantering av brandfarliga gaser, bland annat MSBFS 2020:1 (MSB, 2020b) där ventilation kravställs i utrymmen där brännbar gas lagras eller kan förekomma till följd av läckage.

Ventilation kan vara antingen aktiv eller passiv. Aktiv ventilation innebär att flödet av gaser ut från utrymmet ökas genom yttre påverkan av något slag, exempelvis med fläktar. Passiv ventilation innebär att ventilation sker utan yttre påverkan, i praktiken innebär det att öppningar tillåter gaser att lämna utrymmet. Passiv ventilation kallas ibland naturlig ventilation och aktiv ventilation likställs ibland med mekanisk ventilation.

Ventilation förhindrar antändning genom att hålla gas-luftblandningen i utrymmet under brännbarhetsområdet (Leach & Bloomfield, 1973). Ventilation kan även minska tiden efter utsläpp som gas-luftblandningen är inom brännbarhetsområdet. Även fast ventilationen fungerar som den ska bedöms det finnas risk för att brännbarhetsområdet uppnås nära läckaget eller i hela utrymmet om ett läckage som är större än vad ventilationen dimensionerats för uppstår. Om en antändningskälla uppstår efter en fördröjd tid kan ventilationen hunnit ventilera ut gasen, vilket gör att antändning förhindras.

Ventilation kan även tänkas ha konsekvensreducerande effekter, omfattningen av en explosion kan bli mindre eftersom en del av gasen ventileras ut. Dessutom skulle en passiv ventilationsöppning kunna fungera som tryckavlastning vid en explosion. Ventilationen kan möjligtvis leda till att gasen snabbare blandas ut med luften och tidigare uppnår brännbarhetsområdet i större del av utrymmet. Vid en djupare analys kan vätgasens utblandning med/utan ventilation jämföras samt hur ventilationen påverkar tiden gas-luftblandningen är i brännbarhetsområdet och riskerar att antändas.

4.3.3 Inertering

Ett annat sätt att reducera möjlighet till antändning är inertering som innebär att späda ut gasblandningen med inert gas. Inerta gaser är gaser som inte reagerar med andra ämnen. Den vanligaste inerta gasen är kvävgas, men även argon, koldioxid och andra gaser används. Vid inertering av luften tillsätts inert gas som minskar koncentrationen syre och bränsle, men den främsta funktionen med inerteringen är den termiska barlast som gasen ger (Särdqvist, 2013). Särdqvist beskriver att den inerta gasen tar upp energi från flammen och sänker flamtemperaturen samt reaktionshastigheten.

Inertering av gasblandningen vid ett vätgasläckage skulle kunna användas för att förhindra en antändning genom att sänka bränsle- och syrehalten samt tillföra termisk barlast. Inertering vid ett läckage skulle även kunna begränsa konsekvenserna av en eventuell antändning och på så sätt fungera som en konsekvensreducerande åtgärd.

Eftersom vätgas kräver väldigt lite energi för att antändas kan det i en djupare analys undersökas hur vätgasens lättantändlighet påverkar möjligheten till inertering. En djupare analys kan även utreda åtgärdens konsekvensreducerande förmåga.

4.3.4 Hypoxic air-system

Den inerta gasen kvävgas används även i hypoxic air-system som är en form av passiv inertering. Åtgärden används för att över tiden behålla en syrefattig miljö i ett utrymme (M. Nilsson & van Hees, 2014). Genom att permanent begränsa syrehalten i utrymmet reduceras sannolikheten för antändning och konsekvensen av en antändning kan eventuellt reduceras tack vara den lägre syrehalten i luften. Problemet med hypoxic air är att en lägre syrehalt i luften innebär hälsorisker för människor som vistas i utrymmet.

Kvävehalten i vanlig luft är 78 %. För att inertera en gasblandning med de vanliga bränslena metan, propan och butan behöver en kvävehalt på cirka 84 % uppnås, medan vätgas kräver 94 % (Molkov, 2012). Mer inert gas krävs för att nå inerteringsgränsen för vätgas och människor kan behöva vistas runt vätgashanteringens vilket kan innebära problem i tillämpningen av hypoxic air-system.

Fullständig inertering innebär att syrehalten sänks till noll i utrymmet, och skulle kunna göras i utrymmen där människor inte vistas. En mindre minskning av syrekonzentrationen skulle kunna leda till begränsning av konsekvenser vid en eventuell antändning även där människor tillfälligt behöver vistas. En djupare analys skulle kunna undersöka svårigheterna att inertera lagringsutrymmen till de högre koncentrationer av inert gas som krävs för fullständig inertering av vätgas. Analysen skulle även kunna undersöka hur mycket konsekvenser kan reduceras vid antändning genom en mindre sänkning av syrehalten.

4.4 Branddetektion

Läckagedetektorer (som redovisas i avsnitt 4.2) detekterar läckage men kan inte detektera ett antänt läckage. Det finns olika typer av detektion för att detektera en brand, de vanligaste är rökdetektorer, värmedetektorer och flamdetektorer (Uneram, 2015). När vätgas förbränns är vatten den enda produkten och det bildas därför ingen rök, av denna anledning är rökdetektorer inte ett alternativ. I avsnittet presenteras värmedetektorer och flamdetektorer, två sätt som identifierats för att detektera brand.

4.4.1 Värmedetektion

Värmen från bränder kan detekteras med två olika typer av värmedetektorer.

Maximalvärmedetektorer detekterar vid en fastställd maximal temperatur medan differentialvärmedetektorer detekterar vid en fastställd temperaturhöjning per tidsenhet (Uneram, 2015).

Värmedetektorer är en åtgärd som fyller sitt syfte först efter att antändning skett.

Värmedetektorer kan inte minimera värmestrålningen från en jetflamma, istället ger detektorn förutsättningar för aktivering av andra åtgärder precis som åtgärderna för läckagedetektion.

Detsamma gäller för flamdetektorer.

Värmedetektorer behöver vara placerade i närheten av branden eftersom den förutsätter att tillräckligt mycket värmestrålning eller varm rök når detektorn. Vanligtvis är det den varma röken som stiger och aktiverar en värmedetektor, men brinnande vätgas producerar ingen rök vilket kan försvåra användning av värmedetektorer. På grund av detta bedöms värmedetektorer vara en mindre lämplig riskreducerande åtgärd för vätgasläckage. Vid en djupare analys kan det undersökas en jetflamma kan värma upp luften tillräckligt för att aktivera en värmedetektor och på vilket avstånd detta i så fall ske.

4.4.2 Flamdetektion

Om ett läckage inte upptäcks eller behandlas på rätt sätt och en antändning sker kan branden detekteras med flamdetektor, en detektor som använder optiska sensorer för att detektera elektromagnetisk strålning som avges från flammor. Flamdetektion ger mycket snabb detektering av flammade bränder (Uneram, 2015).

Synliga flammor kan detekteras med videokamera, men ofta används detektorer som detekterar flammor med hjälp av UV-strålning, IR-strålning eller en kombination av UV- och IR-strålning (Xu & Zhang, 2013). Eftersom flamdetektorer använder sig av optisk detektion behöver detektorn se flamman vilket kräver fri siktlinje mellan indikator och flamma.

När vätgas brinner avger flamman inte så mycket strålning inom de våglängder som ögat kan uppfatta vilket innebär att en flamma är svår att detektera med synen, detta gör flamdetektion till en relevant åtgärd för vätgashantering. Vätgasen kan avge mer strålning utanför det synliga spektrumet eftersom den knappt avger strålning inom det synliga området. Flamdetektion borde med hjälp av snabb detektion av strålning från en vätgasflamma utanför det synliga spektrumet bidra till medvetenhet om en jetflammans existens så att vidare åtgärder kan reducera konsekvenserna av denna. Vid en djupare analys kan det undersökas huruvida strålningen från en vätgasflamma är kraftigare i de icke synliga delarna av strålningsspektrumet och om detta underlättar flamdetektion av vätgas.

4.5 Konsekvensreducering

Konsekvensreducerande åtgärder fyller sitt syfte först efter att de sannolikhetsreducerande åtgärderna har misslyckats och en jetflamma eller en explosion har inträffat. Dessa åtgärder syftar till att minimera konsekvensens omfattning i största möjliga mån; funktionaliteten bedöms i förmågan att reducera värmestrålning respektive tryckverkan. De konsekvensreducerande åtgärderna som identifierats är säkerhetsavstånd, fysiska barriärer, tryckavlastning samt sprinklersystem.

4.5.1 Säkerhetsavstånd

Säkerhetsavstånd minskar konsekvenserna vid olyckor med brandfarliga gaser genom att införa en buffertzonen runt hanteringen av den brandfarliga gasen. De två huvudsakliga effekterna från olyckor med brandfarliga gaser, tryckvågor och värmestrålning, avtar båda med avståndet (Bjerketvedt m.fl., 1997; Karlsson & Quintiere, 2000). Genom att öka avståndet mellan skyddsvärde och lagringen av den brandfarliga gasen minskar konsekvenserna.

Säkerhetsavstånd beskrivs i flera standarder och föreskrifter som riskreducerande åtgärd vid hantering av brandfarliga gaser, bland annat i MSBFS 2020:1 (MSB, 2020b). I föreskriften beskrivs rekommenderade minsta avstånd till skyddsvärden vid lagring av brandfarliga gaser. Maximalt rekommenderat skyddsavstånd uppgår till 100 meter men varierar med lagringsvolym och typ av skyddsvärde. Föreskriftens rekommenderade avstånd minskar även vid eventuell brandteknisk avskiljning mellan behållare och skyddsvärde.

Säkerhetsavstånden vid hantering av vätgas borde vara längre än för andra brandfarliga gaser för att uppnå samma konsekvensreducerande effekt. Detta eftersom vätgas kan skapa kraftiga tryckvågor samt att vätgasen även hanteras under höga tryck vilket kan innebära kraftiga jetstrålar vid läckage och därmed stora jetflammar. Säkerhetsavstånd minskar skadeverkan av både jetflamma och explosion, och bör därför vara en applicerbar åtgärd vid vätgashantering. De säkerhetsavstånd som anges i MSBFS 2020:1 (MSB, 2020b) tar enbart hänsyn till behållarens volym och vilket skyddsvärde det är men berör inte total lagringsvolym eller vilken brandfarlig gas som hanteras (undantaget gascisterner för gasol). Vid djupare analys kan säkerhetsavstånden vid vätgashantering undersökas och jämföras med övriga brandfarliga gaser för att uppnå motsvarande konsekvensreducering.

4.5.2 Fysiska barriärer

Fysiska barriärer, det vill säga fysiska avgränsningar mellan skyddsvärden och hantering av brandfarlig gas, syftar till att minimera konsekvenserna vid olyckor. De fysiska barriärerna kan både skydda skyddsvärden från tryckverkan och värmestrålning samt förhindra eventuell brand från att sprida sig. Barriärerna kan utformas på olika sätt, bland annat: skåp som omsluter lagringen av den brandfarliga gasen, brandväggar som förhindrar brandspridning från brandrummet, samt väggar och murar som syftar till att skydda från eventuella tryckvågor.

Fysiska barriärer beskrivs i MSBFS 2020:1 (MSB, 2020b) i form av brandteknisk avskiljning för att möjliggöra kortare säkerhetsavstånd. De fysiska barriärer som syftar till att förhindra spridning av brand måste utformas enligt minst EI 30 enligt SS-EN 13501 för att kortare säkerhetsavstånd ska tillåtas.

Fysiska barriärer reducerar både tryckverkan och värmestrålning genom att förhindra utbredning av dessa. En aspekt som kan vara intressant kring fysiska barriärer vid vätgashantering är att barriärerna påverkar utrymmets utformning. En ändring av utformningen av utrymmet borde kunna påverka luftflöden och därmed antingen öka eller reducera turbulens. Utformningen av fysiska barriärer borde därför möjligtvis kunna ha en inverkan på fenomenet deflagration-to-detonation transition. Deflagration-to-detonation transition är komplext, men vid en djupare analys av detta kan den möjliga inverkan av fysiska barriärer undersökas. Vätgasens förmåga att detonera kan innebära att det bör ställas andra krav på fysiska barriärer vid vätgashantering än för andra brandfarliga gaser.

4.5.3 Tryckavlastning

Ett annat sätt att reducera konsekvenser av tryckverkan vid en explosion är att tryckavlasta rummet i vilket hanteringen av den brandfarliga gaser sker. En gas-luftblandning som antänds innebär en stor tryckökningen i utrymmet, dock minskar tryckuppbyggnaden i utrymmet med öppningsfaktorn (Bengtsson, 1999). Detta innebär att större och fler öppningar som kan tryckavlasta utrymmet leder till en mindre tryckuppbyggnad och därmed reducerad konsekvens.

W. Sun m.fl. (2021) skriver att tryckavlastning är en vanligt förekommande åtgärd för reducering av konsekvenser vid hantering av brännbara gaser inom flertalet industrier. Att åtgärden är vanligt förekommande styrks även av att det finns en europastandard som specificerar de krav som ställs på anordningar för tryckavlastning. Europastandarden gäller som svensk standard SS-EN 14797:2006 (Svenska institutet för standarder, 2007).

Tryckavlastning är en åtgärd som skulle kunna påverka luftflöden och därmed möjligheten till turbulens i utrymmet. Precis som för fysiska barriärer skulle tryckavlastning kunna innebära en inverkan på deflagration-to-detonation transition. Öppningar för tryckavlastning som leder till det fria och inte är stängda i normalläge borde även kunna bidra till förbättrad ventilation, detta skulle innebära att två separata syften kan erhållas från denna åtgärd (antändningsskydd och konsekvensreducering). Oftast är tryckavlastning utformat med luckor som öppnar först vid ett visst övertryck; en anledning till detta kan vara att man inte vill tillåta utomhusklimat att råda inne i anläggningar. I de fall utomhusklimat kan tillåtas skulle öppningar som är öppna i normalläge vara intressant. Luckor som öppnar vid ett visst övertryck kan eventuellt vara svåra att implementera för vätgashantering eftersom vätgasens höga flamhastighet skulle kunna innebära att luckorna är för långsamma.

I en djupare analys kan det undersökas om vätgasens höga flamhastighet påverkar möjligheten att använda sig av tryckavlastningsluckor som öppnar vid ett visst övertryck. Även möjligheten att kombinera tryckavlastning med ventilation genom användning av öppna luckor kan undersökas. I en djupare analys kan även tryckavlastningsluckors eventuella påverkan på deflagration-to-detonation transition utredas.

4.5.4 Sprinklersystem

Ett sprinklersystem avger vatten vid aktivering och kan exempelvis vara sprinkler, vattenspray eller vattendimma. Om en brandfarlig gas antänder och en jetflamma uppstår kan flammans konsekvenser reduceras genom att begränsa effektutvecklingen. Ett sätt att begränsa effektutvecklingen och brandförloppet är att använda sig av ett sprinklersystem som vid detektion sprutar vatten över flamman och utrymmet för att kyla jetflamman och det som träffas av den. Vatten är det vanligaste släckmedlet och energi från branden går åt till att värma och förångas vattnet vilket minskar brandens omfattning (Särdqvist, 2013).

Bland sprinklersystemen finns det flera olika systemtyper och munstycken. Anläggningens utformning, vilka brandriskerna är samt verksamheten som bedrivs är några av faktorerna som avgör vilken systemtyp och vilket munstycke som används. Vattendimma är en systemtyp som har högre tryck, mindre flöde och mindre droppstorlek jämfört med vanlig sprinkler. Fördelen med vattendimma är att släckeffektiviteten är högre och därmed är behovet av vatten mindre vilket kan minska vattenskadorna (Uneram, 2015). De minsta dropparna från ett vattendimma-munstycke ger egenskaper som påminner om gassläckmedel (Brandskyddsföreningen, u.å.).

Sprinklersystem används som konsekvensreducerande åtgärd för att kyla det som träffas av jetflamman. En jetflamma kan eventuellt vara större och varmare för vätgas än andra brandfarliga gaser eftersom hantering under högt tryck skulle kunna innebära en kraftigare jetström. Detta kan innebära andra förutsättningar för implementering av sprinklersystem vid vätgashantering.

Sprinklersystem skulle även kunna användas innan antändning eftersom de minsta dropparna i en vattendimma skulle kunna fungera som ett antändningsskydd. Det kan även vara möjligt att vattendimma som aktiveras innan antändning skulle kunna reducera kraften i en eventuell explosion, vattendimma borde vara effektivare än vanlig sprinkler i ett sådant sammanhang eftersom den mindre droppstorleken skulle kunna innebära att vattnet suspenderas i luften. Aktivering av vattendimma under ett läckage skulle dock kunna innebära att turbulens skapas i utrymmet vilket kan bidra till deflagration-to-detonation transition. Möjligheten att använda vattendimma för antändningsskydd hade kunnat undersökas vidare i en djupare analys.

4.6 Selektion av riskreducerande åtgärder

I avsnittet selekteras två riskreducerande åtgärder för djupare analys av deras applicerbarhet som riskreducerande åtgärd för vätgashantering. Selektionen sker med motiveringar utifrån teori och kartläggning, avsnitt 2 och 4.

Samtliga åtgärder förutom luktsättning och värmedetektion anses lämpliga för djupare analys av applicerbarheten. På grund av arbetets tidsbegränsning och den valda metoden har endast två riskreducerande åtgärder kunnat analyseras för att uppnå det önskade metodmässiga djupet i analyserna.

Eftersom läckage av vätgas kan innebära allvarliga händelseförlopp anses det vara viktigt att snabbt detektera ett läckage för att ge förutsättningar att begränsa eventuella skador. Om detektion sker snabbt kan flödet begränsas i ett tidigt skede, genom exempelvis avstängning av ventiler, vilket reducerar sannolikheten för allvarliga händelseförlopp.

Två detektionsmetoder som utifrån kartläggningen ger snabb detektion är ljuddetektion och flamdetektion. Både ljud och ljus transporteras snabbt vilket innebär att ett läckage tidigt bör kunna detekteras med ljuddetektor och en jetflamma snabbt bör kunna detekteras med flamdetektor. Vätgas har dessutom egenskaper som skulle kunna innebära bättre förutsättningar för både ljud- och flamdetektion i jämförelse med andra brandfarliga gaser.

Åtgärderna ljuddetektion och flamdetektion selekteras för djupare analys.

5 Ljuddetektion

I avsnittet presenteras den djupare analysen av den riskreducerande åtgärden ljuddetektion. Inledningsvis presenteras processen för litteratursökningen följt av litteraturstudiens resultat. Därefter presenteras resultatet från laborationsförsöken som genomfördes och slutligen en diskussion kring resultaten.

5.1 Litteratursökning

I avsnittet presenteras processen för litteratursökningen som genomfördes för ljuddetektion.

Processen följer den metod som presenterades i avsnitt 3.2. Urvalskriterier som användes för ljuddetektion presenteras i tabell 7.

Tabell 7 – Urvalskriterier för ljuddetektion.

Urvalskriterier ljuddetektion
Artikeln ska behandla gasläckage
Artikeln ska behandla detektion med hjälp av ljud
Artikeln ska kunna användas för att bedöma ljuddetektorers applicerbarhet vid vätgashantering
Artikeln ska behandla ljuddetektion utanför komponenter som hanterar gasen

De inkluderande samt exkluderande sökord som användes och antalet träffar som erhöles i Scopus databas från kombinationer av dessa presenteras i tabell 8 och tabell 9.

Tabell 8 – Sökord som användes i litteratursökningen.

	Sökord	Förklaring
A	hydrogen OR gas	Väte eller gas
B	ultrasonic OR ultrasound OR acoustic OR ugld OR sound	Ljud
C	detect* OR instrument OR sensor	Detektor
D	leak* OR release	Läckage
E	frequenc* OR spectr*	Ljudspektrum
F	*water OR buried	Undervatten/-jordslagring
G	liquid	Flytande lagring
H	drug OR medicine	Medicin
I	offshore	Olje-/gasverk

Tabell 9 – Sökningen skedde med hjälp av kombinationer av de sökord som presenterades i tabell 8. Med ”+” menas ”AND” mellan sökorden. Med ”-” menas ”AND NOT” mellan sökorden. Datum för sökningar: 2021-10-13.

Sökning #	Kombination av sökord	Antal träffar
1	A	3 574 324
2	A+B	63 566
3	A+B+C	14 783
4	A+B+C+D	1 508
5	A+B+C+D+E	502
6	A+B+C+D-F-G-H-I	872

Sökning 6 var den som användes. Se tabell 10 för den fullständiga söktermen.

Tabell 10 – Fullständig sökterm som användes för ljuddetektion.

Riskreducerande åtgärd	Sökterm
Ljuddetektion	TITLE-ABS-KEY (hydrogen OR gas AND ultrasonic OR ultrasound OR acoustic OR ugd OR sound AND detect* OR instrument OR sensor AND leak* OR release AND NOT (*water OR buried OR liquid OR drug OR medicine OR offshore))

Genom sökstrategin som presenterades i avsnitt 3.2.1 utslöts artiklar med hjälp av urvalskriterier. I tabell 11 presenteras antalet träffar som är relevanta efter de olika stegen i sökprocessen.

Tabell 11 – Antal inkluderade artiklar efter varje steg av sökprocessen.

Steg i sökprocess	Antal artiklar
1. Sökning i Scopus databas med kombinationer av sökord.	872
2. Uteslutning av artiklar på annat språk än engelska.	784
3. Uteslutning av artiklar utifrån deras titel och abstract med hjälp av urvalskriterier.	73
4. Uteslutning av artiklar där fullständig artikel inte kunde hittas	46
5. Uteslutning av artiklar utifrån hela artikelns innehåll med hjälp av urvalskriterier.	14
6. Granskning av referenser (eng. snowballing) i de utvalda artiklarna genom applicering av urvalskriterier på titel och abstract.	17

Efter utslutningen samt tillskott genom snowballing återstår 17 artiklar som inkluderas i litteraturstudien.

5.2 Litteraturstudie

De 17 artiklar som inkluderades utgör underlag för detta avsnitt. I underrubrikerna presenteras först olika variablers påverkan på ljudet vid gasläckage, därefter beskrivs ljuddetektorers mekanismer samt fördelar och nackdelar och slutligen hur ljuddetektion av vätgasläckage skiljer sig från övriga gaser.

Det upptäcktes i litteratursökningen att det finns flera olika sorters läckagedetektion med hjälp av ljud. Många träffar i litteratursökningen behandlade detektion av läckage i långa rörledningar (eng. pipelines) där ljudvågor som skapas av läckaget fortplantas i mediet som transporteras, eller i själva röret, för att sedan detekteras. Dessa detektionsmetoder detekterar läckage med hjälp av ljudvågor men ligger utanför arbetets avgränsningar.

5.2.1 Ljud vid gasläckage

För att förstå avsnittet krävs förståelse av grundläggande akustik. Ljudnivå mäts i decibel (dB) som är en logaritmisk skala. En ökning med 10 dB motsvarar en effektförändring med faktor 10, en ökning med 3 dB motsvarar alltså nästan en dubbling av ljudeffekten. Vid addition av ljudnivåer adderas ljudeffekten: vid bakgrundsljud på 40 dB och ett utsläpp på 40 dB blir den resulterande ljudnivån alltså 43 dB (E. Nilsson m.fl., 2005).

Ljuddetektion förutsätter att läckaget avger ultraljud som kan uppfattas av en detektor. Ultraljud är ljud vars frekvenser överstiger människans hörselspektrum (Leighton, 2007). Den lägre gränsen för ultraljud är 20 kHz, medan en övre gräns inte är definierad. Ultraljud används för flera olika syften och kan även skapas naturligt. Se tabell 12 för två användningsområden samt ultraljudets spektrum i förhållande till den mänskliga hörseln.

Tabell 12 – Några vanliga ljudfrekvenser. Illustrerande exempel, ej säkerställda källor.

Ljudfrekvens	Beskrivning
20 Hz	Lägre mänsklig gräns
25–150 Hz	Katts spinnande
85–255 Hz	Mänsklig röst
17 kHz	Ljudet som skapas av tjock-tv (CRT)
20 kHz	Övre mänsklig gräns
25–100 kHz	Ljuddetektorer
455 & 850 kHz	Ekolod

Ljuddetektorerna som åsyftas i arbetet identifierar ljudet som skapas vid ett gasläckage, det vill säga ljudet som skapas när gas flödar ut genom en liten öppning på grund av en tryckskillnad. Enligt Malm (1998) bildas turbulens när gasen färdas genom öppningen vilket skapar ett högfrekvent ljud, detta stämmer överens med Sizeland (2014) som menar att både vanligt ljud och ultraljud bildas varav ultraljudet med fördel kan detekteras eftersom bakgrundsljudet är lägre i höga frekvenser.

Xiao m.fl. (2012) beskriver i sin artikel att turbulensen, som beror på höga Reynoldstal, bildas i flödets strömvirvel. Wang m.fl. (2015) menar att hög tryckskillnad leder till höga flödes hastigheter, som i sin tur ger höga Reynoldstal och hög turbulens. Hög turbulens leder till hög frekvens, vilket Wang m.fl. presenterar med en empirisk ekvation som visar förhållandet mellan frekvens och flödes hastighet samt hålstorlek. Ekvationen visar att en högre flödes hastighet innebär en högre frekvens och att en mindre håldiameter innebär en högre frekvens.

Öppningens storlek och form

Hålstorleken kan även användas för att uppskatta ljudnivån. Att öppningens form och storlek påverkar ljudet som skapas presenteras i flera av artiklarna som granskades i litteraturstudien. Två studiers resultat tyder på att ljudnivån ökar med hålets storlek: Saunoris m.fl. (2003) från 0,25 mm till 1 mm i diameter, respektive Kotani m.fl. (2004) från 0,5 mm till 2 mm i diameter. Maeda och Tamuras (2017) resultat med vätgas visar istället en sänkning i ultraljudnivå från 4,57 mm till 7,045 mm i diameter – detta kan stämma överens med Sizeland (2014) som menar att ultraljudnivån ökar med hålets storlek till en viss (ej definierad) nivå och därefter sjunker. Det går utifrån dessa resultat inte att dra några generella slutsatser kring hur ljudnivån påverkas av storleksförändringar, men de visar på en skillnad i ljudnivå beroende på hålstorlek. Se tabell 13 för en sammanställning av hålstorlekens påverkan på ljudnivån. Maeda och Tamuras (2017) artikel tyder även på att formen på hålet påverkar ljudnivå och frekvenser eftersom deras tester med olika form på hålet ger stor skillnad på ljudnivåer, se tabell 14.

Tabell 13 – Skillnad i ljudnivå vid förändring av håldiameter. De första tre är kvantitativa resultat från experiment.

Förändring i håldiameter	Gas	Skillnad i ljudnivå	Källa
0,25 till 1 mm	Luft	Ökar	Saunoris m.fl. (2003)
0,5 till 2 mm	Kvävgas	Ökar	Kotani m.fl. (2004)
4,57 till 7,045 mm	Vätgas	Minskar	Maeda & Tamura (2017)
Generell ökning	Luft	Ökar	Xiao m.fl. (2012)
Generell ökning	Generellt	Ökar först, därefter minskar	Sizeland (2014)

Tabell 14 – Skillnad i ljudnivå i ultraljudsspektrum för olika hålstorlek och form på läckagehålet. Hoptryckt ände innebär att röret har kapats och därefter tryckts ihop (eng. crimped). Diametern mäts innan hoptryckningen av änden. Data tagna från figurer och är ungefärlig (Maeda & Tamura, 2017).

Storlek och form på hålet	Vätgas 118 NL/min. Ljudnivå i ultraljudsfrekvenser [dB]	Helium 125 NL/min. Ljudnivå i ultraljudsfrekvenser [dB]
Rör 4,57 mm diameter, cirkulär ände	43–53	47–51
Rör 4,57 mm diameter, hoptryckt ände	89–92	87–92
Rör 7,045 mm diameter, cirkulär ände	~38	35–36
Rör 7,045 mm diameter, hoptryckt ände	76–81	78–81

Lagringstryck

Ett högre lagringstryck ökar generellt ljudnivån vid läckage: Saunoris m.fl. (2003) visar att ljudnivån ökar i alla frekvenser över 5 kHz när lagringstrycket ökar från 9,81 bar till 68,6 bar. Kotani m.fl. (2004) visar att ljudnivån ökar i alla frekvenser när lagringstrycket ökar från 1 till 6 bar. Dessa två resultat tyder tillsammans på att ljudnivån ökar med ett högre tryck, dock skiljer trycken stort från de lagringstryck som vätgas kan lagras i (300–900 bar). Wang m.fl. (2015) presenterar ekvationer som visar att ett högre lagringstryck även leder till högre frekvenser i ljudet från läckaget.

Gasens egenskaper

Den hanterade gasens egenskaper kan påverka ljudnivån och frekvensspektrumet vid ett läckage. Maeda och Tamura (2017) presenterar att ljudnivån vid utsläpp av 118 NL/min vätgas från ett hål med 4,57 mm i diameter motsvaras av liknande flöde helium, men lägre flöde argon och luft, ungefär 82 NL/min, se tabell 15. Författarna presenterar även att frekvensspektrumet skiljer sig för de olika gaserna i jämförelse med vätgas vid samma totala ljudnivå: i ultraljudsfrekvenser är ljudnivån ungefär 3 dB lägre för helium, 4–9 dB lägre för argon och 7–12 dB lägre för luft, se tabell 15. Xiao m.fl. (2012) presenterar en ekvation för total ljudnivå vid gasläckage, där en högre densitet på jetströmmen leder till ökad total ljudnivå – detta stämmer överens med Maeda och Tamuras resultat som visar att de tyngre gaserna kräver lägre flöde för motsvarande totala ljudnivå. Eftersom lättare gaser har högre flöde för samma ljudnivå borde mer turbulens uppstå vid läckaget vilket kan vara anledningen till att vätgas har högre ljudnivåer i ultraljudsfrekvenser. Observera att flödet skiljer sig för olika gaser vid lika tryck.

Tabell 15 – Samma totala ljudnivå med olika gasflöde, samt motsvarande skillnad i ultraljudsspektrum (20–40 kHz). Ljudnivå mätt rakt framifrån. Data tagna från figurer och är ungefärlig (Maeda & Tamura, 2017).

Gas	Läckage som motsvarar samma totala ljudnivå. Cirkulärt hål, 4,57 mm diameter [NL/min]	Skillnad i ljudnivå i ultraljudsfrekvenser jämfört med vätgas vid samma totala ljudnivå (20–40 kHz) [dB]	Densitet vid 20 °C [kg/m ³]
Vätgas	118	–	0,0899
Helium	125	-3	0,1664
Argon	82	-4 till -9	1,661
Luft	82	-7 till -12	1,205

Avstånd från läckage till mikrofon

Den uppmätta ljudnivån beror även på avståndet från läckaget till mikrofonen. Enligt Maeda och Tamura (2017) är den totala ljudnivån högst 5 meter från vätgasläckage och sjunker därefter med ökande avstånd, detta menar de beror på att frekvenser över 2,5 kHz är lägre nära läckaget.

Naranjo och Baliga (2009b) stödjer detta med sitt resultat som visar att ljudnivån ökar fram till 4 meter från läckaget och därefter minskar för vätgas, medan ljudnivån direkt sjunker med avståndet för metan, etylen och kvävgas. Kotani m.fl. (2004) och Saunoris m.fl. (2003) visar för kvävgas respektive luft att ljudnivån alltid sjunker med avståndet. Moon m.fl. (2009) menar att en mindre molekylstorlek vanligtvis innebär att mindre läckagehål kan upptäckas med ultraljud. Detta talar för att vätgas, med en mindre molekylstorlek än övriga brandfarliga gaser, har bättre möjligheter för detektion med hjälp av ultraljud. Naranjo och Baliga (2009b) visar att läckage av gaser med lägre densitet avger högre ljudnivå både nära och längre ifrån läckaget. Tabell 16 och tabell 17 presenterar hur avstånd påverkar uppmätt ljudnivå.

Tabell 16 – Hur avstånd påverkar uppmätt ljudnivån vid gasläckage.

Gas	Resultat	Källa
Vätgas	Ljudnivån ökar till 5 m, därefter minskar	Maeda och Tomura (2017)
Vätgas	Ljudnivån ökar till 4 m, därefter minskar	Naranjo och Baliga (2009b)
Metan, etylen, kvävgas	Ljudnivån minskar direkt med avståndet	Naranjo och Baliga (2009b)
Kvävgas	Ljudnivån minskar med avståndet	Kotani m.fl. (2004)
Luft	Ljudnivån minskar med avståndet	Saunoris m.fl. (2003)

Tabell 17 – Olika gasers ljudnivå vid olika avstånd. Cirkulärt hål, 1 mm diameter, 800 bar lagringstryck (Naranjo & Baliga, 2009b).

Gas	Ljudnivå, 2 m avstånd [dB]	Ljudnivå, 5 m avstånd [dB]	Ljudnivå 10 m avstånd [dB]
Vätgas	101	102 (+1)	92 (-9)
Helium	95	89 (-6)	79 (-16)
Kvävgas	90	–	–
Metan	88	80 (-8)	68 (-20)
Etylen	85	75 (-10)	–

Riktning från gasläckage till mikrofon

Ljudnivån vid ett gasläckage beror på riktningen från vilken denna mäts. Maeda och Tamuras (2017) arbete indikerar att ljudnivån från läckan varierar med vinkeln från läckagepunkten vilket också styrks av flera andra källor. Deras resultat visar att ljudnivån i ultraljudsfrekvenser är som högst för vätgas och helium inom 60–120° (där 0° är rakt framifrån), medan ljudnivån i ultraljudsfrekvenser är lägst vid 0–30° samt 180°. Resultaten tyder även på att vinkeln har större påverkan vid ultraljudsfrekvenser jämfört med lägre frekvenser, samt att skillnaden är större för gaser med lägre densitet. Saunoris m.fl. (2003) presenterar i sitt arbete att ljudnivån vid utsläpp av luft är som högst rakt framför utsläppet (0°), och snabbt avtar efter 30° vinkel i ultraljudsfrekvenser. Moon m.fl. (2009) hävdar att 90° i förhållande till utsläppet ger lägst ljudnivå. Att vinkeln påverkar styrks även av Naranjo och Baliga (2009b) som skriver att 45° vinkel från läckaget generellt innebär högre ljudnivå än framifrån respektive rakt från sidan. Malm (1998) bekräftar vidare detta genom att hävda att ultraljudets intensitet är större vid 30–60° än rakt framför läckaget. Ljudnivån kan även bero på vilken höjd mätningen sker på, det vill säga vertikal vinkel och avstånd (Maeda & Tamura, 2017). Resultaten presenteras i tabell 18.

Tabell 18 – Riktningar med högst respektive lägst ljudnivå vid gasläckage. 0° innebär rakt framför läckaget. För vätgas är ljudnivån högst 90° från utsläppet enligt Maeda och Tamura (2017).

Gas	Riktningar med högst ljudnivå	Riktningar med lägst ljudnivå	Källa
Vätgas	60–120°	0–30°, 180°	Maeda och Tamura (2017)
Helium	60–120°	0–30°, 180°	Maeda och Tamura (2017)
Argon	30–60°	0°, 150–180°	Maeda och Tamura (2017)
Luft	60–90°	0°, 180°	Maeda och Tamura (2017)
Luft	0–30°	–	Saunoris m.fl. (2003)
Luft	–	90°	Moon m.fl. (2009)
Generellt	45°	–	Naranjo och Baliga (2009b)
Generellt	30–60°	–	Malm (1998)

Sammanfattning av presenterade variabler

Avsnittet visar att många variabler påverkar ljudnivån och frekvensspektrumet vid utsläpp av gas. Öppningens storlek och form, riktningen från utsläppet och gasens egenskaper kan alla påverka ljudnivån och frekvensspektrumet på olika sätt. Ett högre lagringstryck ökar generellt ljudnivån, medan ett längre avstånd generellt minskar ljudnivån annat än närmare än 4–5 meter. Gasens egenskaper kan påverka både ljudnivå och frekvensspektrum. I tabell 19 presenteras en sammanställning av resultaten.

Tabell 19 – Sammanfattning av identifierade variabler samt hur de påverkar ljudnivå och frekvensspektrum vid gasläckage.

Variabel	Påverkan på ljudnivå	Påverkan på frekvensspektrum
Öppningens storlek	Öppningens storlek kan påverka ljudnivån	Större öppning innebär lägre frekvenser
Öppningens form	Öppningens form kan påverka ljudnivån	Öppningens form kan påverka frekvensspektrumet
Lagringstryck	Högre lagringstryck ökar ljudnivån	Högre lagringstryck innebär högre frekvenser
Avstånd	Längre avstånd minskar ljudnivån	Ej tillräcklig information från litteraturstudien
Riktning från utsläppet	Ökande vinkel från utsläppet påverkar ljudnivån	Ökande vinkel från utsläppet påverkar ljudnivån mer inom ultraljudsfrekvenser
Gasens egenskaper	Lättare gaser innebär lägre ljudnivå vid lika flöde, men högre ljudnivå vid lika tryck	Lättare gaser innebär högre ljudnivåer i ultraljudsfrekvenser vid motsvarande totala ljudnivå

5.2.2 Ljuddetektorer

Litteraturstudien har visat att ljuddetektorer kan vara handhållna eller fast installerade. Handhållna detektorer verkar främst vara användbara för att lokalisera ett redan detekterat läckage, fokus har därför riktats mot fast installerade ljuddetektorer.

Sensorerna (mikrofoner) i moderna ljuddetektorer detekterar förändringar inom frekvensintervallet 25–100 kHz (ultraljud) och ignorerar förändringar inom det mänskliga hörselspektrumet (Sizeland, 2014). Naranjo och Baliga (2009b) menar att de flesta ljuddetektorerna på marknaden detekterar frekvenser inom spannet 25–70 kHz, vilket är ett mindre intervall men fortfarande inom ultraljudsspektrumet.

Detektorerna upptäcker läckage genom att mäta förändringar i bakgrundsljudet (Naranjo & Baliga, 2009a), när ljudnivån från läckaget överstiger bakgrundsljudet inom ultraljudspektrumet detekteras läckaget av ljuddetektorn (Naranjo & Baliga, 2009b; Sizeland, 2014). Flera studier visar att ljudnivån från gasläckage överstiger bakgrundsljudet i den miljö som ljudmätningarna har gjorts i (Maeda & Tamura, 2017; Moon m.fl., 2009; Xiao m.fl., 2012), detta indikerar att ljuddetektorer generellt fungerar väl för att upptäcka läckage av gas.

Bakgrundsljud inom ultraljudsspektrumet är ofta lågt i industriella miljöer (Malm, 1998; Moon m.fl., 2009), enligt Naranjo och Baliga (2009b) cirka 50-60 dB. Andra källor presenterar ljudnivåer under 40 dB för bakgrundsljud inom ultraljudspektrumet i miljöer där forskningsförsök för läckageljud utförts (Maeda & Tamura, 2017; Xiao m.fl., 2012). Eftersom bakgrundsljudet varierar mellan anläggningar behöver detektorn anpassas till de specifika förutsättningarna som råder. Naranjo (2009) hävdar att ljuddetektorer ställs in på en förbestämd ljudnivå och när denna ljudnivå överskrids identifierar detektorn händelsen som läckage. Det finns även mer avancerade detektionssystem: Kotani m.fl. (2004) visar att bakgrundsljud i anläggningar förändras med tiden och beskriver hur detektorer med hjälp av algoritmer i så kallade neuronätverk kan övas i att anpassa sig efter förändringar i anläggningen för att bli mer tillförlitliga. Även Shibata m.fl. (2008) beskriver hur ett läckage kan detekteras med algoritmer för att förbättra tillförlitligheten.

Databladet för ljuddetektorn *Observer-i* från General Monitors (u.å.) styrker att ljuddetektorer kan vara antingen förinställda vid en viss ljudnivå, likt vad Naranjo (2009) hävdar, eller använda sig av neuronät för att skilja på bakgrundsljud och läckageljud. General Monitors beskriver att ljuddetektorn tack vare neuronätet kan skilja på bakgrundsljud och läckageljud och därmed detektera läckageljud med ljudnivåer ner till 40 dB. Företaget skriver att produktens teknologi innebär att ljud vid frekvenser ända ner till 12 kHz kan detekteras vilket innebär att detektorn även analyserar utanför ultraljudsspektrumet. General monitors anger i databladet ett exempel på detektionsavstånd för detektorn i ett specifikt försök: med användning av neuronät anges 17–28 meter, utan neuronät 7–24 meters detektionsavstånd.

Ett annat exempel på en ljuddetektor är Det-Tronics *FlexSonic Acoustic Detector*, se figur 8 i avsnitt 3.3, som är ljuddetektorn som användes i arbetets laborationsförsök. Detektorn använder sig av ultraljudsfrekvenser i intervallet 20–80 kHz för att detektera gasläckage (Det-Tronics, 2021). Två olika lägen som är olika avancerade kan ställas in för detektorn beroende på tillämpningen. Det mindre avancerade läget (basic mode) använder sig av ett valbart tröskelvärde för ljudnivå (40–100 dB) vid vilket detektorn ska larma, väljs inget tröskelvärde är 59 dB standardinställningen. Det mer avancerade läget (profile mode) använder sig av algoritmer för att optimera detektionsmöjlighet utifrån bakgrundsljudet i den specifika miljön. Detta innebär att det endast krävs mindre förändringar i ljudnivån i ultraljudsfrekvenser, användaren ställer själv in hur många dB över bakgrundsljud som ska resultera i detektion. I laborationsförsöket användes basic mode.

För ljuddetektorer är en nackdel det begränsade avståndet inom vilket detektorn kan identifiera läckage. Ljudet avtar med avståndet från läckan (Leighton, 2007; Naranjo & Baliga, 2009b; Xiao m.fl., 2012) vilket innebär att sensorerna i detektorerna har ett maximalt detekteringsavstånd. Det maximala detektionsavståndet för ljuddetektorer beror på flera faktorer, bland annat variablerna beskrivna i tabell 19 ovan. Även bakgrundsljudet i den aktuella miljön påverkar möjligheten till detektion och därmed radien inom vilken detektorn kan identifiera läckage (Kotani m.fl., 2004). Sizeland (2014) hävdar att ljuddetektorer kan identifiera läckage på 15–20 meters avstånd i väldigt tysta miljöer, medan miljöer med höga ljudnivåer innebär maximalt detektionsavstånd på 7–10 meter. Detta stämmer relativt väl överens med exemplet från General Monitors som tidigare beskrivits. En annan nackdel med ljuddetektorer kan vara att detekteringsmöjligheten inte är lika god i alla riktningar från utsläppet, detta beror på att ljudnivån varierar med riktningen vilket beskrivits tidigare i avsnitt 5.2.1.

En stor fördel med ljuddetektorer är att deras funktion kan verifieras i anläggningen där de ska användas. Genom att använda sig av en inert gas kan ett gasutsläpp simuleras i den riktiga miljön och optimal placering av detektorerna kan bestämmas (Naranjo & Baliga, 2009a; Sizeland, 2014). En annan fördel är att detektionen sker väldigt snabbt (Moon m.fl., 2009; Naranjo & Baliga, 2009a) vilket beror på att den enda tid som behövs för att identifiera ett läckage är tiden det tar för detektorn att analysera läckageljudet. Vidare är detektorerna lätthanterade (Kotani m.fl., 2004) och utrustningen kräver inte mycket underhåll (Malm, 1998; Naranjo & Baliga, 2009b; Sizeland, 2014).

5.2.3 Skillnader mellan ljuddetektion av vätgas och övriga gaser

För att utreda applicerbarheten av ljuddetektion för vätgashantering sammanställs här de för vätgas relevanta resultaten från litteraturstudien. Maeda och Tamura (2017) menar att ingen tidigare studie har gjorts för vätgas på gasläckageljud, detta indikerar att det inte finns mycket forskning inom ämnet som är direkt applicerad på vätgas. Resultatet från litteraturstudien kan användas för att presentera skillnader mellan ljuddetektion av vätgas och andra brandfarliga gaser.

Tabell 19 ovan presenterar utifrån litteraturen vilka variabler som påverkar ljudnivån och frekvensspektrumet för ljudet som avges från ett läckage. Den mest intressanta variabeln som är unik för vätgas är ”gasens egenskaper”. Resultaten visar att lättare gaser har en högre total ljudnivå både nära och längre ifrån läckaget än tyngre gaser vid samma tryck (ej att förväxla med flöde). Vid samma totala ljudnivå har även lättare gaser högre ljudnivåer inom ultraljudsfrekvenser. Vätgas är den lättaste gasen, resultatet från litteraturstudien visar alltså att vätgas är lättare att detektera med ljuddetektorer än andra gaser vid lika lagringsförhållanden.

En annan intressant variabel är lagringstrycket eftersom vätgas ofta hanteras under höga tryck. Resultaten visar att högre lagringstryck innebär en ökad ljudnivå och högre frekvenser vid läckage, gaser som hanteras under höga tryck (exempelvis vätgas) är därför lättare att detektera med hjälp av ljuddetektorer vid ett läckage.

Resultatet visar även att variablerna avstånd, öppningens storlek samt riktning från utsläppet innebär skillnad i påverkan på ljudnivån för vätgas i jämförelse med övriga gaser. I försök med vätgas har ljudnivån visat sig öka med avståndet upp till 4–5 meter från läckagepunkten för att sedan minska, medan resultaten visar att ljudnivån direkt minskar med avståndet för övriga undersökta gaser, se tabell 16 ovan. Ljudnivån minskar långsammare med avstånden för vätgas än för övriga undersökta gaser, se tabell 17.

Litteraturstudiens resultat visar även att ljudnivån varierar med riktningen från läckaget. Den enda källan som undersökt vätgas specifikt uppmätte högst ljudnivå i sidled, cirka 90° vinkel från läckaget (60–120° vinkel). De övriga källorna som hanterar andra gaser än vätgas visar att riktningen med högst ljudnivå istället är framifrån eller runt 45°, se tabell 18 ovan.

I tabell 20 presenteras de variabler där resultatet har visat skillnader mellan vätgas och andra gaser. Det beskrivs förenklat hur varje variabel påverkar läckagedetektion med ljuddetektorer samt där möjligt konstateras det om påverkan innebär bättre förutsättningar för detektion av vätgas.

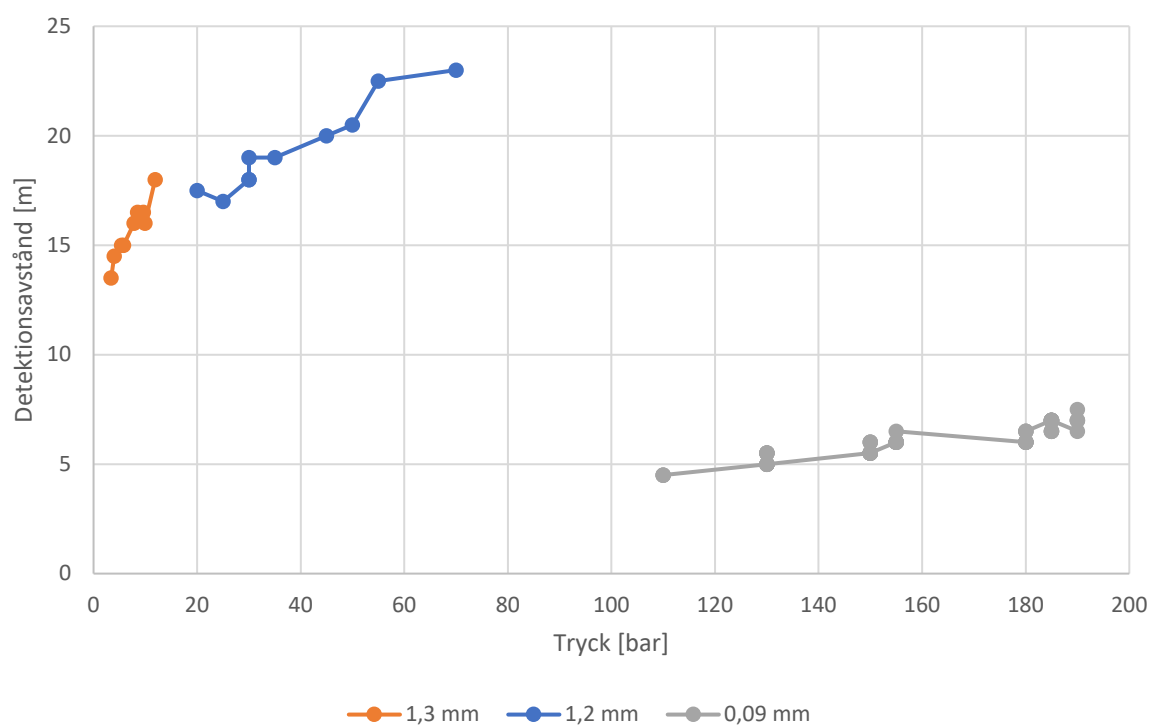
Tabell 20 – En sammanställning av litteraturstudiens resultat

Variabel	Påverkan vid ljuddetektion av vätgas jämfört med andra gaser
Öppningens storlek	Större öppning ökar ljudnivån för alla undersökta gaser förutom vätgas. För vätgas minskar ljudnivån med ökad hålstorlek.
Lagringstryck	Högre tryck ger högre ljudnivåer och högre frekvenser. Vätgas lagras ofta i högre tryck än övriga brandfarliga gaser. Bättre förutsättningar för detektion.
Avstånd	Ljudnivån minskar långsammare med avståndet för vätgas än övriga undersökta gaser.
Riktning från utsläppet	För vätgas är ljudnivån högst i sidled, medan övriga gaser har högst ljudnivåer snett framifrån.
Gasens egenskaper (lätt/tung gas)	Lättare gaser ger högre ljudnivå vid samma tryck. Vätgas är den lättaste gasen och har därför bättre förutsättningar för detektion.

5.3 Laborationsförsök

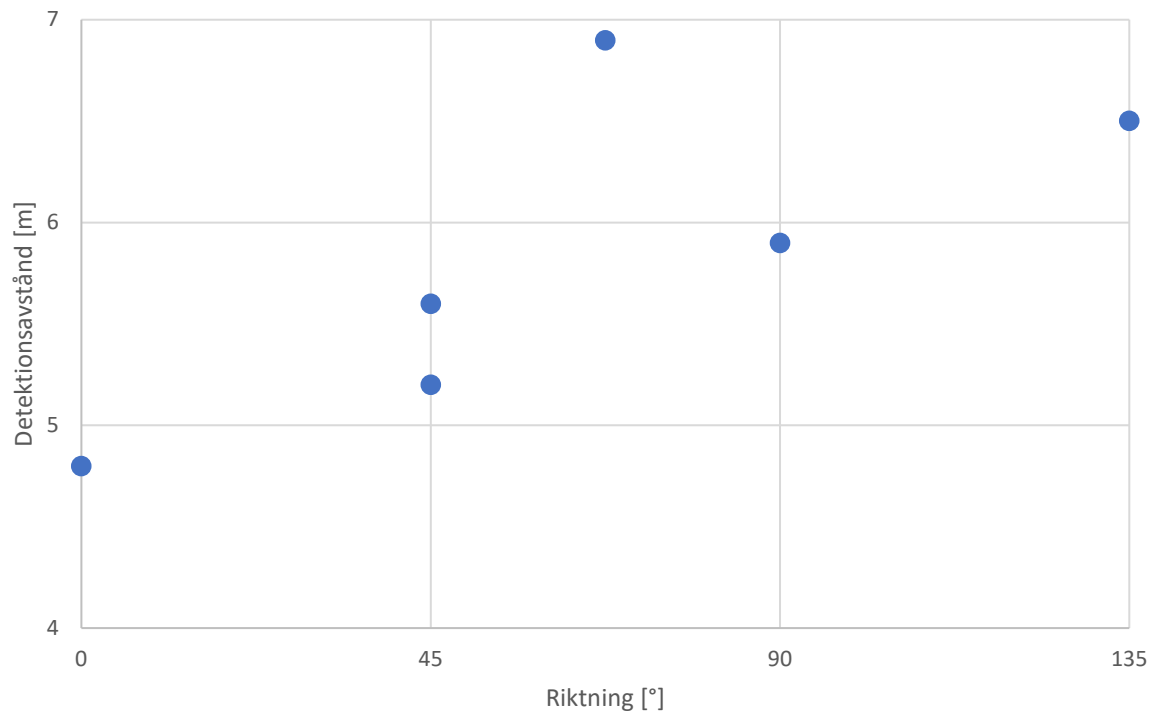
Laborationsförsöken genomfördes i enlighet med avsnitt 3.3. För att förstå avsnittet krävs förståelse av grundläggande akustik som presenteras i 5.2.1. Ljudnivå mäts i decibel (dB) som är en logaritmisk skala där 10 dB motsvara en ökning i ljudvolym med 10 gånger. Människor hör upp till 20 kHz, över denna nivå kallas ljudet ultraljud. Resultaten är uppdelade enligt de testade variablerna, se avsnitt 3.3 för respektive försöks uppställning.

Figur 11 visar maximala detektionsavstånd för ljuddetektorn vid olika tryck och hålstorlek. Vid 1,3 mm håldiameter ökar detektionsavståndet relativt linjärt från 14 meter vid 3,4 bar till 18 m vid 12 bar, medan 1,2 mm håldiameter ger detektionsavstånd från cirka 17 meter vid 20 bar till 23 meter vid 70 bar. Vid 0,09 mm håldiameter är detektionsavståndet 4,5 meter vid 110 bar och ökar till 7 meter vid 190 bar. Dessa resultat visar att detektionsavstånd ökar med hålstorlek från 0,09 mm till 1,2 mm, och det är även troligt att utsläpp med motsvarande tryck har längre detektionsavstånd för 1,3 mm håldiameter jämfört med 1,2 mm. Resultaten visar att detektionsavståndet ökar relativt linjärt vid dessa tryck för alla tre hålstorlekar.



Figur 11 – Detektionsavstånd för utsläpp vid olika tryck. Linjerna illustrerar olika håldiametrar. Detektorn som användes var FlexSonic Acoustic Detector.

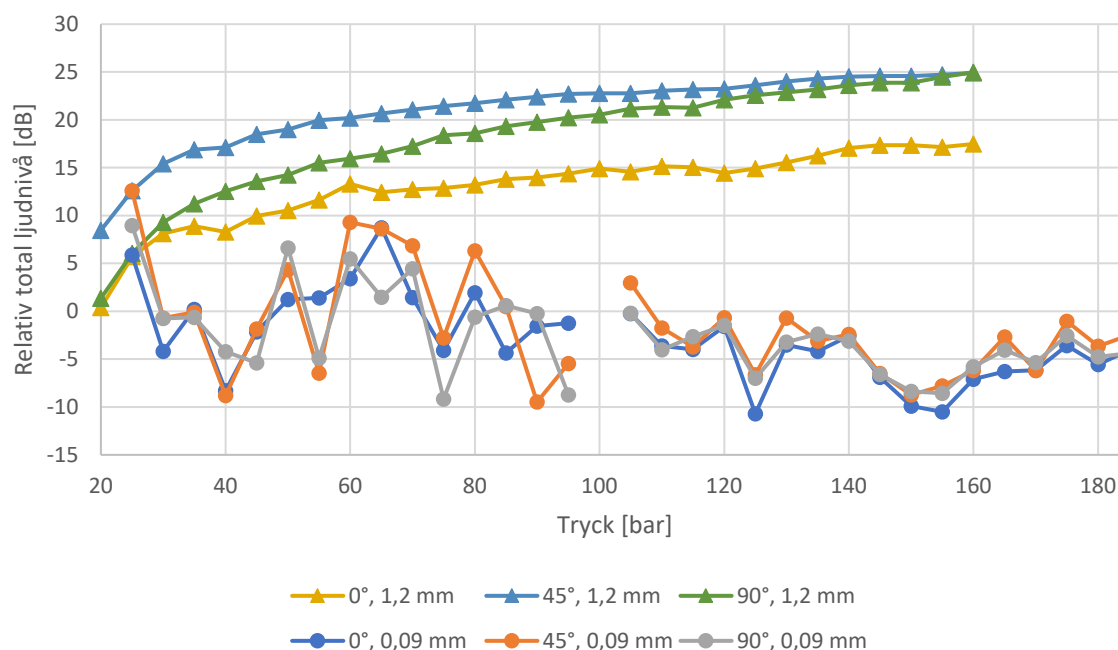
Figur 12 visar hur ljuddetektorns maximala detektionsavstånd påverkas av riktningen från utsläpp vid 120 bars tryck med 0,09 mm håldiameter. Detektionsavståndet varierar från 4,8 m rakt framifrån (0°) till 6,9 m vid 67,5° och 6,5 m vid 135°. Detektionsavståndet är kortast rakt framifrån, högre vid 45 och 90° och längst vid 67,5 och 135°. Resultatet kan vara osäkert eftersom riktningen av utsläppet var svårt att bedöma; se diskussion kring felkällor i avsnitt 7.



Figur 12 – Maximala detektionsavstånd i olika riktningar för utsläpp vid 120 bar och 0,09 mm håldiameter. Observera att avståndet börjar på 4 meter. FlexSonic Acoustic Detector.

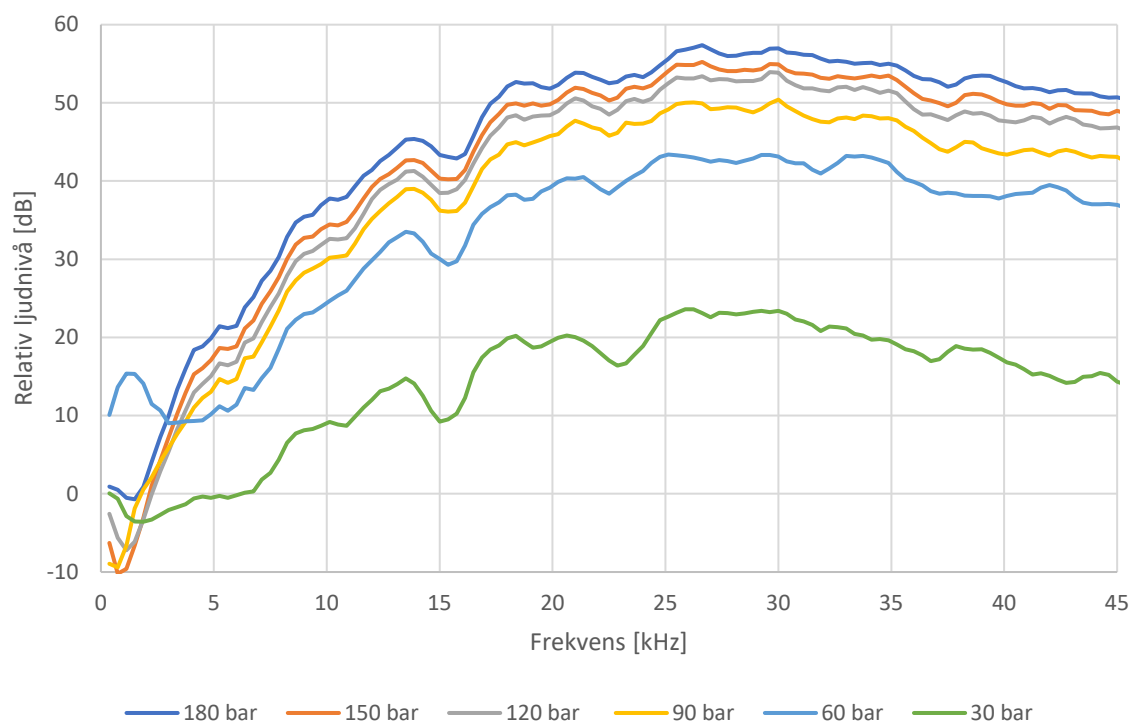
Figur 13 presenterar hur ljudnivå vid utsläpp påverkas av tryck, hålstorlek och vinkel. Ljudnivån som presenteras är i förhållande till bakgrundsljudet: en ljudnivå på 0 dB betyder att utsläppet inte påverkar ljudnivån, ljudnivån beror endast på bakgrundsljudet. Bakgrundsljudet är medelvärde under inspelningstiden i försök 5. Eftersom bakgrundsljudet varierar kan ljudnivån även vara negativ: i dessa fall är den totala ljudnivån från utsläppet lägre än medelnivån av bakgrundsljudet. Den relativa ljudnivån för utsläpp med 0,09 mm håldiameter är vid samtliga tryck omkring 0 dB vilket indikerar att den totala ljudnivån inte märkbart har påverkats av utsläppet. För utsläpp med 1,2 mm håldiameter är ljudnivån alltid över bakgrunds-nivån och ökar logaritmiskt från 8,5 dB vid 20 bar till 25 dB vid 160 bar för 45° vinkel. Vid de högsta trycken nådde förstärkaren maximal ljudnivå och klippte ljudsignalen, ljudnivån kan alltså vara högre vid de högsta trycken än vad resultatet visar. Ljudnivån borde inte skilja nämnvärt från resultatet eftersom ljudnivån verkar öka logaritmiskt.

Figur 13 syftar även till att visa hur riktningen från utsläppet påverkar ljudnivån. För utsläpp med 0,09 mm håldiameter är ljudnivån ungefär samma som bakgrundsljudet i alla tre riktningar, men vid 45° är ljudnivån generellt något högre än de övriga vinklarna. För utsläpp med 1,2 mm håldiameter är ljudnivån högre vid 45° än övriga vinklar, denna skillnad avtar dock vid högre tryck. Den avtagande skillnaden kan bero på att förstärkaren nådde maximal ljudnivå och klippte ljudsignalen vid de högre trycken för 45 och 90°, men eftersom ökningen beter sig logaritmiskt samt liknande ökningen vid 0° borde klippningens påverkan inte vara omfattande. Över 30 bar är ljudnivån för 90° högre än 0°, denna skillnad ökar med trycket. Mikrofonen som användes vid 0° (M23) är av annan typ än de som användes vid 45 och 90° (M30); se diskussion kring felkällor i avsnitt 7.



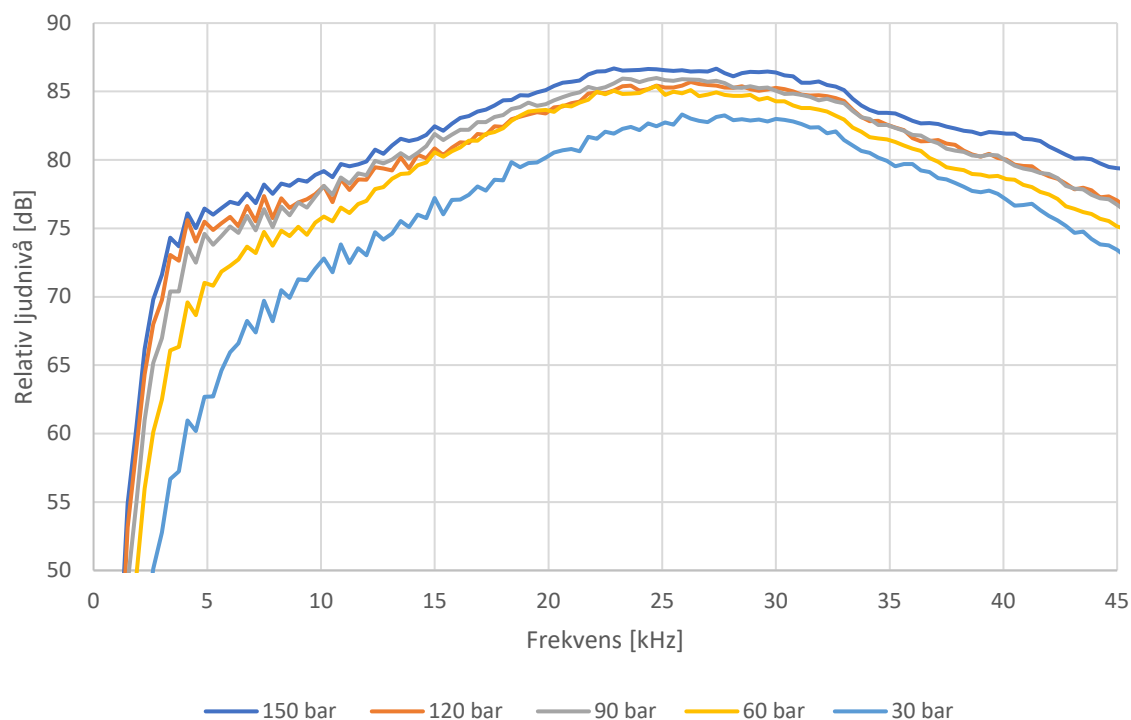
Figur 13 – Total ljudnivå relativt bakgrundsljud för utsläpp vid olika tryck. Inget värde vid 100 bar uppmättes för 0,09 mm håldiameter. Linjerna illustrerar olika riktningar och håldiameter. Mikrofon M23 rakt framifrån, M30 från sidorna.

Figur 14 presenterar hur ljudnivån jämfört med bakgrundsljudet påverkas av tryck i olika frekvenser för utsläpp med 0,09 mm håldiameter. För denna hålstorlek är den totala ljudnivån jämfört med bakgrundsljudet i medelvärde 0 dB (se figur 13), detta är möjligt eftersom bakgrundsljudet har 20 dB högre ljudnivå i låga frekvenser än utsläppets högsta ljudnivåer. I frekvenser över 5 kHz är ljudnivån högre för utsläppet än bakgrundsljudet vid alla tryck förutom 30 bar, som först når högre ljudnivåer vid ungefär 7 kHz. Ljudnivåskillnaden mot bakgrundsljudet ökar upp till cirka 30 kHz, därefter sjunker ljudnivån igen. Denna minskning kan bero på att mikrofonerna endast har en garanterat linjär frekvensrespons upp till 30 kHz (se bilaga). Över 3 kHz ökar ljudnivån i samtliga frekvenser med trycket, denna ökning betar sig logaritmiskt.



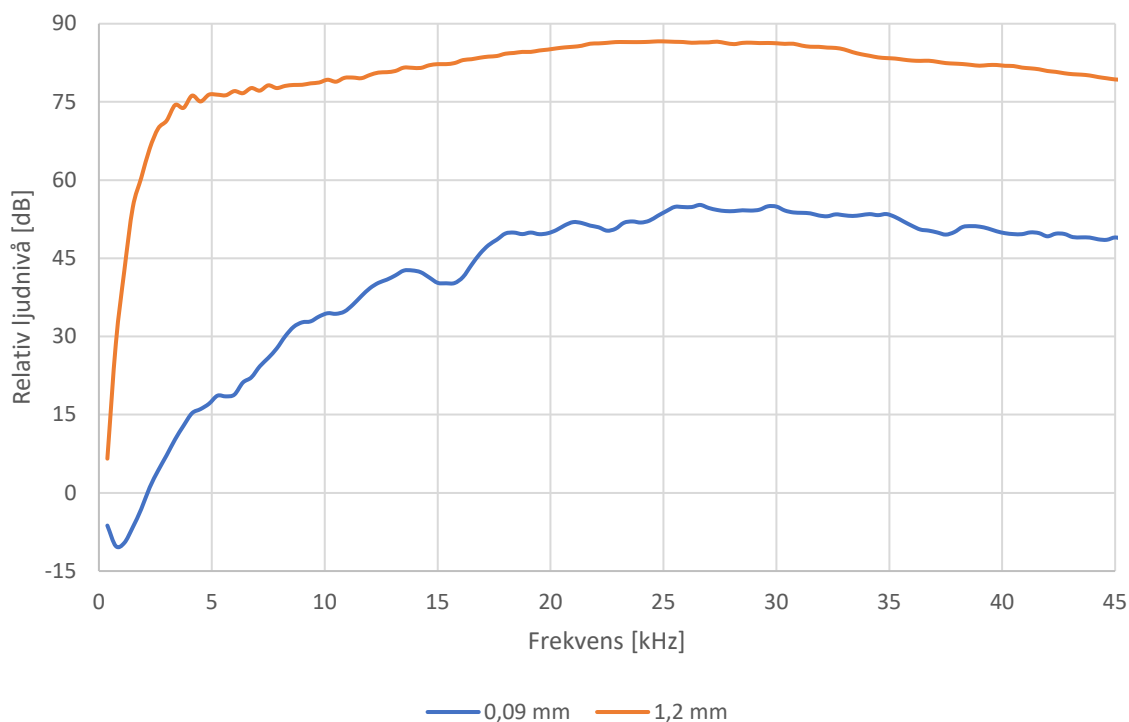
Figur 14 – Ljudnivå relativt bakgrundsljud i olika frekvenser för utsläpp i 45° riktning. Linjerna illustrerar olika tryck. Håldiameter 0,09 mm.

Figur 15 visar hur ljudnivån jämfört med bakgrundsljudet påverkas av tryck i olika frekvenser för utsläpp med 1,2 mm håldiameter. I frekvenser under 4 kHz ökar ljudnivån mycket snabbt, detta beror på att bakgrundsljudet har låga ljudnivåer över 2 kHz, alltså blir den relativa ljudnivån mycket högre. Från cirka 4 kHz avtar ökningen, men ökningen fortsätter fram till ungefär 25 kHz. Över 30 kHz avtar ljudnivån, denna minskning kan bero på att mikrofonernas frekvensrespons (se föregående stycke). I samtliga frekvenser ökar ljudnivån med ökande tryck: upp till cirka 5 kHz beter sig ökningen logaritmiskt, över 5 kHz är det svårt att avgöra om ökningen är linjär eller logaritmisk.



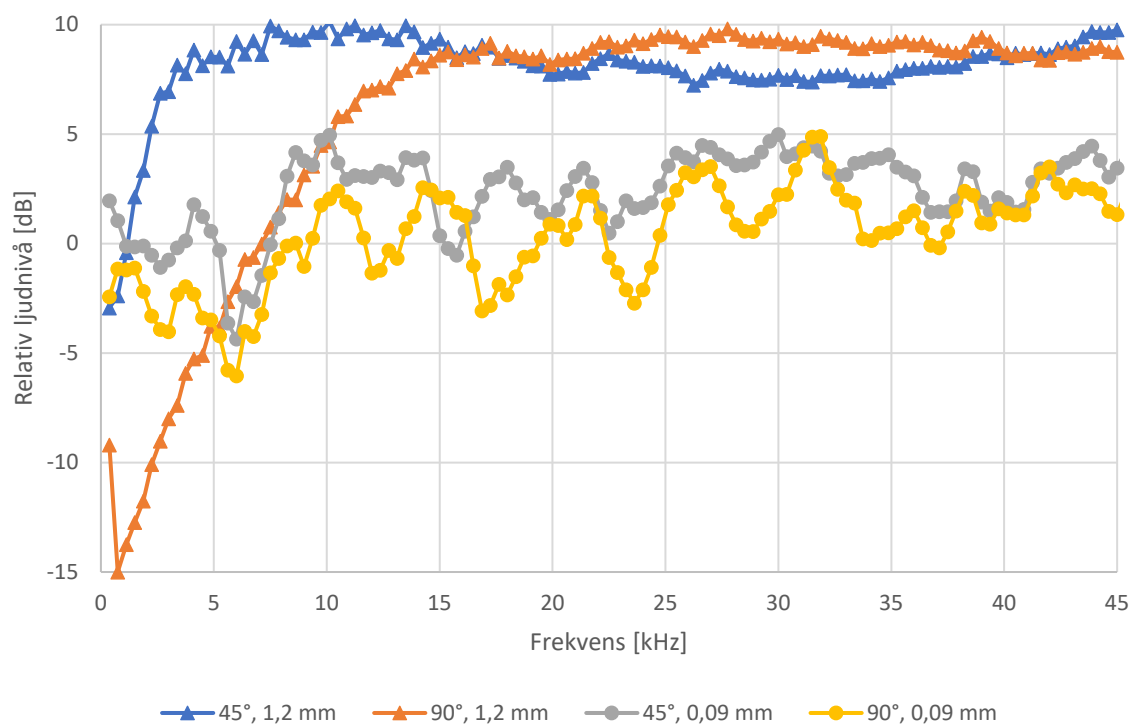
Figur 15 – Ljudnivå relativt bakgrundsljud i olika frekvenser för utsläpp i 45° riktning. Observera att ljudnivån börjar på 50 dB. Linjerna illustrerar olika tryck. Håldiameter 1,2 mm.

Figur 16 presenterar hur ljudnivån i olika frekvenser påverkas av hålstorleken vid 150 bar. Resultatet visar tydligt att ljudnivån är mycket högre för 1,2 mm än 0,09 mm i samtliga frekvenser. Vid 5 kHz är skillnaden cirka 60 dB och vid 25 kHz är skillnaden cirka 30 dB. Att skillnaden blir mindre kan bero på att bakgrundsljudet är högre i lägre frekvenser, alltså krävs det vid lägre frekvenser högre ljudnivåer av utsläppen för att det ska särskiljas från bakgrundsljudet.



Figur 16 – Ljudnivå relativt bakgrundsljud i olika frekvenser för utsläpp vid 150 bar i 45° riktning. Linjerna illustrerar olika håldiameter.

Figur 17 syftar till att visa hur ljudnivån i olika frekvenser påverkas av riktningen. Ljudnivåerna i figuren är relativt ljudnivån för motsvarande hålstorlek vid 0°, ett positivt värde innebär alltså att ljudnivån är högre än den uppmätta ljudnivån rakt framifrån utsläppet. För utsläpp med håldiameter 1,2 mm är ljudnivån högre vid 45° vinkel jämfört med 0° från 1,5 kHz, och vid 90° vinkel från 8 kHz. Fram tills 15 kHz är ljudnivån vid 45° högre än vid 90°. Från 15 kHz är ljudnivån högre vid 90° vinkel med en skillnad på cirka 1,5 dB mellan 25 och 35 kHz. Från 40 kHz blir ljudnivån högre vid 45°, detta kan bero på mikrofonernas frekvensrespons som inte är säkerställd över 30 kHz. För utsläpp med 0,09 mm håldiameter är skillnaden inte lika stor, ljudnivån är generellt något högre för 45° än 90°, som i sin tur är något högre än för 0° (som motsvarar 0 dB i figuren).



Figur 17 – Ljudnivå relativt riktning 0° i olika frekvenser för utsläpp vid 150 bar. Linjerna illustrerar olika riktningar och håldiameter.

Se tabell 21 för sammanställda resultat från laborationsförsöken samt resultat från litteraturstudien.

Tabell 21 – Testade variablers påverkan på ljudnivå utifrån laborationsförsök respektive litteraturstudie. För avstånd uppmättes ingen ljudnivå i laborationsförsöken.

Variabel	Påverkan på ljudnivå utifrån laborationsförsök	Påverkan på ljudnivå utifrån litteraturstudie
Öppningens storlek	Större öppning innebär högre ljudnivå i samtliga frekvenser.	Större öppning ökar ljudnivån för alla undersökta gaser förutom vätgas. För vätgas minskar ljudnivån med ökad hålstorlek.
Lagringstryck	Högre lagringstryck innebär högre ljudnivå i samtliga frekvenser.	Högre tryck ger högre ljudnivåer och högre frekvenser. Vätgas lagras ofta i högre tryck än övriga brandfarliga gaser. Bättre förutsättningar för detektion.
Avstånd	Längre avstånd förhindrar detektion.	Ljudnivån minskar långsammare med avståndet för vätgas än övriga undersökta gaser.
Riktning från utsläppet	Lägst ljudnivå rakt framifrån. För 0,09 mm hålstorlek är ljudnivån högst i 45° vinkel. För 1,2 mm hålstorlek är ljudnivån högre i det hörbara spektrumet i 45° vinkel men högre i ultraljudsfrekvenser i 90° vinkel.	För vätgas är ljudnivån högst i sidled, medan övriga gaser har högst ljudnivåer snett framifrån.

5.4 Diskussion

I avsnittet diskuteras resultaten från litteraturstudien och laborationsförsöken.

Laborationsförsökens resultat stämmer till stor del överens med litteraturstudien. Enligt båda resultaten ger större öppningar högre ljudnivåer för utsläpp av brandfarliga gaser, dock presenterar Maeda och Tamura (2017) att ljudnivån sjunker vid större hålstorlekar.

Laborationsförsöken visade att ljudnivån ökade från 0,09 till 1,2 mm håldiameter medan Maeda och Tamuras resultat visar en minskning från 4,57 till 7,045 mm. Sizeland (2014) menar att ljudnivån först ökar med ökande hålstorlek och därefter minskar, vilket stämmer överens med resultaten både från litteraturstudien och laborationsförsöken. Eftersom hålstorlekarna skiljer sig mycket mellan Maeda och Tamuras resultat och laborationsförsöken går det inte att avgöra vid vilken hålstorlek påverkan på ljudnivån vänder.

Både litteraturstudien och laborationsförsöken visar att högre lagringstryck leder till högre ljudnivåer vid läckage. Laborationsförsöken tyder på att ljudnivån ökar logaritmiskt, vilket skulle innebära att ljudnivån påverkas mindre vid högre tryck: ljudnivån av utsläpp vid 900 bar borde enligt resultaten vara högre än ljudnivån i laborationsförsöken men inte nödvändigtvis nio gånger högre än vid 100 bar. Beakta att ljudnivå mäts logaritmiskt, alltså ökar den faktiska ljudenergin linjärt.

Att ljudnivån minskar med avståndet framkommer både från litteraturstudien och laborationsförsöken. Litteraturstudien visar att ljudnivån först ökar upp till 5 meters avstånd och därefter minskar. Laborationsförsöken undersökte inte hur ljudnivån påverkas av avståndet, men eftersom detektorn detekterade upp till ett visst avstånd innebär det att ljudnivån minskade med avståndet. Det går inte utifrån laborationsförsöken att dra några slutsatser kring hur ljudnivån avtar med avståndet.

Riktningen från utsläppet är den variabel som har mest varierande resultat. Litteraturstudien visar att ljudnivån är högst i sidled (90°) för vätgas vilket stämmer överens med laborationsförsöken med 1,2 mm håldiameter i ultraljudsfrekvenser. Flera olika källor visar dock att ljudnivån är högst ungefär snett framifrån (45°) utsläppet för gaser generellt, vilket även stämmer överens med 0,09 mm håldiameter-försöket. Både litteraturstudien och laborationsförsöken visar att ljudnivån är lägre rakt framifrån. Sammanfattningsvis tyder resultaten på att ljudnivån är högst i sidled och lägre rakt framifrån. Ljudnivå över 135° vinkel har inte analyserats.

Gasegenskapers påverkan på ljuddetektion har endast analyserats i litteraturstudien.

Litteraturstudien visade att lättare gaser innebär högre ljudnivå vid lika tryck samt att en större andel av den totala ljudnivån är i ultraljudsfrekvenser. Det borde innebära att vätgas är lättare att detektera eftersom det är den lättaste gasen.

Både riktningen från läckaget till ljuddetektorn och avståndet mellan läckage och detektor påverkar detektionsmöjligheterna. Påverkan på detektionsmöjligheterna verkar skilja sig mellan vätgas och övriga brandfarliga gaser, men det går utifrån resultatet inte att dra slutsatser kring placering av ljuddetektorer. Detektorns riktning till utsläppet (dit detektorn pekar) har heller inte analyserats, inga slutsatser kan dras kring hur detta påverkar detektionsmöjligheterna.

Detektionsavstånden i laborationsförsöken var korta, speciellt för det verkliga läckaget, vilket kan indikera att ljuddetektorn inte fungerar bra för läckage av vätgas. Förklaringen till detta kan vara att detektorns basic-läge användes när detektionsavstånd för ljuddetektorn uppmättes. Basic-läge innebär att detektorn detekterar läckage vid en förinställd ljudnivå på 59 dB i ultraljudsfrekvenser. Detektorn har även ett mer avancerat läge där detektorn med hjälp av algoritmer optimerar detektionsmöjligheten utifrån det aktuella bakgrundsljudet. Standardläget användes eftersom möjlighet att ändra till det avancerade läget saknades. Resultaten från mikrofonerna visar att utsläppens ljudnivå var mycket högre än bakgrundsljudet i ultraljudsfrekvenser för båda hålstorlekar, även vid låga tryck. Figur 11 visar att detektionsavståndet var cirka 5 meter vid 130 bar för läckaget med håldiameter 0,09 mm, samtidigt som figur 14 visar att ljudnivån vid mikrofonen (på 5 meters avstånd med samma vinkel) inom ultraljudet var ca 50 dB högre än bakgrundsljudet vid 130 bar, för samma håldiameter. Utifrån denna data kan det konstateras att detektionsavståndet för detektorn hade varit längre med det avancerade läget men eftersom mikrofonerna enbart mätte ljudnivå vid 5 meters avstånd är det svårt att säga hur mycket längre. De stora skillnaderna mellan ljudet från utsläppet och bakgrundsljudet i ultraljudsfrekvenser indikerar att det avancerade läget hade inneburit avsevärt längre detektionsavstånd än de som erhöles.

I resultatet från laborationsförsöket presenteras den minsta hålstorleken som ett hål med diameter 0,09 mm, men i verkligheten hade läckaget förmodligen en annan form än en perfekt cirkel. Litteraturstudien visar att formen på hålet kan påverka ljudnivå, se tabell 14 ovan. I Maeda och Tamuras (2017) försök som visade att ljudnivån påverkas av formen på hålet minskade hålstorleken när formen ändrades eftersom de tryckte ihop hålet, detta innebär att det kan ha varit den ändrade hålstorleken och inte den ändrade formen som hade störst påverkan på ljudnivån. Det kan inte med säkerhet sägas hur formen på hålet påverkat resultaten.

Enligt litteraturstudien är bakgrundsljudet i industriell miljö lågt i ultraljudsfrekvenser, vilket bör innebära att resultaten även går att tillämpa i industrier där bakgrundsljudet är högre än det som spelades in i laborationsförsöken och som har använts i rapporter från litteraturstudien. Detta innebär tillsammans med övriga resultat och diskussioner att ljuddetektorer som verkar inom ultraljudsfrekvenser är väl lämpade för att upptäcka läckage av vätgas.

6 Flamdetektion

I avsnittet presenteras den djupare analysen av den riskreducerande åtgärden flamdetektion. Inledningsvis presenteras processen för litteratursökningen följt av litteraturstudiens resultat. Därefter presenteras ett kort resultat från laborationsförsöken och slutligen en diskussion kring resultatet.

6.1 Litteratursökning

I avsnittet presenteras processen för litteratursökningen som genomfördes för flamdetektion.

Processen följer den metod som presenterades i avsnitt 3.2. Urvalskriterier som användes för flamdetektorer presenteras i tabell 22.

Tabell 22 – Urvalskriterier för flamdetektion.

Urvalskriterier flamdetektion
Artikeln ska behandla flamdetektion
Artikeln ska behandla detektion med hjälp av ljus
Artikeln ska kunna användas för att bedöma flamdetektorers applicerbarhet vid vätgashantering

De inkluderande samt exkluderande sökord som användes och antalet träffar som erhöles i Scopus databas från kombinationer av dessa presenteras i tabell 23 och tabell 24.

Tabell 23 – Sökord som användes i litteratursökningen.

	Sökord	Förklaring
A	flame	flamma
B	detector	detektor
C	ultraviolet OR infrared OR uv OR ir	ljus
D	organic* OR biol* OR food* OR anima*	biologi
E	medi* OR biom* OR blood	medicin
F	mineral* OR "heavy metal"	mineral

Tabell 24 – Sökningen skedde med hjälp av kombinationer av de sökord som presenterades i tabell 23. Med ”+” menas ”AND” mellan sökorden. Med ”-” menas ”AND NOT” mellan sökorden. Datum för sökningar: 2021-11-02.

Sökning #	Kombination av sökord	Antal träffar
1	A	176 582
2	A+B	10 436
3	A+B+C	1 127
4	A+B+C-D-E-F	822

Sökning 4 var den som användes. Se tabell 25 för den fullständiga söktermen.

Tabell 25 – Fullständig sökterm som användes för flamdetektion.

Riskreducerande åtgärd	Sökterm
Flamdetektion	TITLE-ABS-KEY (flame AND detector AND (ultraviolet OR infrared OR ir OR uv) AND NOT (organic* OR mineral* OR food* OR anima* OR medi* OR biom* OR biol* OR blood OR "heavy metal"))

Genom sökstrategin som presenterades i avsnitt 3.2.1 uteslöts artiklar med hjälp av urvalskriterier. I tabell 26 presenteras antalet träffar som är relevanta efter de olika stegen i uteslutningen.

Tabell 26 – Antal inkluderade artiklar efter varje steg av sökprocessen.

Steg i sökprocess	Antal artiklar
1. Sökning i Scopus databas med kombinationer av sökord.	822
2. Uteslutning av artiklar på annat språk än engelska.	755
3. Uteslutning av artiklar utifrån deras titel och abstract med hjälp av urvalskriterier.	102
4. Uteslutning av artiklar där fullständig artikel inte kunde hittas	73
5. Uteslutning av artiklar utifrån hela artikelns innehåll med hjälp av urvalskriterier.	15
6. Granskning av referenser (eng. snowballing) i de utvalda artiklarna genom applicering av urvalskriterier på titel och abstract.	18

Efter uteslutningen samt tillskott genom granskning av referenser återstår 18 artiklar som inkluderas i litteraturstudien.

6.2 Resultat av litteraturstudie

De 18 artiklar som inkluderades utgör underlag för detta avsnitt. I underrubrikerna presenteras först hur ljus från flammor och ljus i omgivningen beter sig, därefter beskrivs flamdetektorers mekanismer samt olika typer av flamdetektorer och deras respektive för och nackdelar. Slutligen beskrivs och diskuteras hur flamdetektion av vätgasflammor skiljer sig från andra brandfarliga gaser.

6.2.1 Ljus från flammor

För att förstå avsnittet krävs grundläggande förståelse av ljus och elektromagnetisk strålning. Elektromagnetisk strålning vid våglängder runt 380 till 740 nanometer kan uppfattas av våra ögon, och därför kallas ljus inom detta spektrum för synligt ljus. Elektromagnetisk strålning med våglängder på cirka 1–380 nm är under människans synspektrum och kallas för ultraviolett ljus (UV-ljus), medan ljus med våglängder från cirka 740 nm upp till 1 mm kallas för infrarött ljus (IR-ljus). Tabell 27 illustrerar delen av det elektromagnetiska spektrumet som är relevant för arbetet.

Tabell 27 – Elektromagnetiska spektrumets uppdelning i ultraviolett, synligt och infrarött ljus. Utöver dessa finns gamma- och röntgenstrålning innan det ultravioletta spektrumet samt mikro- och radiovågor efter det infraröda spektrumet.

Våglängd	Frekvensområde
1–380 nm	Ultraviolett ljus
380–740 nm	Synligt ljus
740–1 000 000 nm (1 mm)	Infrarött ljus

För att en flamdetektor ska detektera en flamma krävs en ljussignatur som skiljer sig från bakgrundsljuset. Bakgrundsljus är oftast ljus från svetsning och lampor eller svartkroppsstrålning från varma kroppar och solljus. Svetsning avger generellt främst UV-ljus men även en del IR-ljus beroende på vilken typ av svetsning som sker (Middleton, 1983; Skippon & Short, 1993). Lampors ljusavgivning varierar med lampans teknik: vanliga glödlampor strålar starkt i det infraröda spektrumet (Kranz, 1995) medan halogenlampor avger mer ultraviolett ljus (Middleton, 1983).

Svartkroppsstrålning är den elektromagnetiska strålning som alla objekt konstant avger. I industrimiljöer kan motorer eller annan varm utrustning avge svartkroppsstrålning (Kushnir & Kopchak, 2021). Strålningen som avges kan approximeras med hjälp av objektets temperatur vilket gör det möjligt att uppskatta ljusspektrumet. Svartkroppsstrålning är primärt inom det infraröda spektrumet, men vid höga temperaturer (över 1 000 °C) blir strålningen även ultraviolett. Vid mycket höga temperaturer (över 5 000 °C) blir strålningen som starkast i det ultravioletta spektrumet.

Solens elektromagnetiska strålning motsvarar en svartkroppsstrålning vid ungefär 6 000 °C, och leder enligt Middleton (1983) till en ljusstyrka som för flamdetektorer motsvarar en 0,1 m² bensenbrand på 20 meters avstånd. Det ljusspektrum från solen som når marken motsvarar dock inte svartkroppsstrålningen eftersom atmosfären absorberar olika i frekvensspektrumet. I låga ultravioletta våglängder, under 300 nm, absorberas strålningen av ozonet i den övre atmosfären (Engelhaupt m.fl., 2005; Middleton, 1983). Vid ungefär 1 300 till 1 800 nm absorberas strålningen av vatten enligt Engelhaupt m.fl. (2005). Runtomkring 2 700 nm absorberas mycket strålning av vatten och koldioxid: enligt Arens m.fl. (2014) sker absorptionen från 2 500 till 3 000 nm, enligt Engelhaupt (2005) från 2 600 till 2 800 nm och enligt Middleton (1983) från 2 500 till 2 900 nm. På motsvarande sätt beskriver de tre artiklarna absorption av koldioxid runt 4 300 nm: 4 200–4 500 nm (Arens m.fl., 2014), 4 200–4 400 nm (Engelhaupt m.fl., 2005) och 4 200–4 600 nm (Middleton, 1983). Se tabell 28 för sammanfattning av de våglängder där ljus absorberas av atmosfären.

Tabell 28 – Sammanfattning av våglängder där ljus absorberas av atmosfären. I UV-spektrumet absorberar endast ozon ljuset medan både vatten och koldioxid absorberar ljuset i flera delar av IR-spektrumet.

Våglängd	Absorption av	Källa
<300 nm	Ozon	Engelhaupt m.fl. (2005) och Middleton (1983)
1 300–1 800 nm	Vatten	Engelhaupt m.fl. (2005)
2 500–3 000 nm	Vatten och koldioxid	Arens m.fl. (2014), Engelhaupt m.fl. (2005) och Middleton (1983)
4 200–4 600 nm	Koldioxid	Arens m.fl. (2014), Engelhaupt m.fl. (2005) och Middleton (1983)

Ljus som avges av flammor är till största del i det synliga och infraröda spektrumet. Shekhar m.fl. (2013) skriver att endast 10 % av den elektromagnetiska strålningen avges som UV-ljus, detta stämmer överens med Tsai och Young (2006) som beskriver att endast en liten mängd UV-ljus avges av kolvätebränder. Enligt Kushnir (2021) avges denna låga mängd UV-ljus främst runt 220 nm oavsett vad som brinner. Inom IR-spektrumet har litteraturstudien främst resulterat i information om kolvätebränder. Den data som presenteras i samtliga artiklar jämför kolvätebränder med bakgrundsljus, och i samtliga artiklar beror strålningstoppar på att koldioxid eller vatten bildas och strålar. Vatten avger strålning runt 1 800 och 2 700 nm, medan koldioxid avger strålning runt 2 800 och 4 300 nm (Fuhs m.fl., 1993; Kushnir & Kopchak, 2021; Powell m.fl., 1987; Song m.fl., 2019). Kolväten strålar alltså jämfört med bakgrundsljus främst runt 1 800 nm, 2 700–2 800 nm och 4 300 nm; detta stämmer överens med tabell 28 ovan som presenterar de våglängder där vatten respektive koldioxid absorberar ljus i atmosfären.

I korta våglängder strålar vätgas från 200 till 400 nm, med en topp vid 300 nm (Arens m.fl., 2014; Harper & Norman, 1990; Schefer m.fl., 2009; Yates m.fl., 1988). För det synliga spektrumet beskriver Arens m.fl. (2014) vätgasbränder i princip är osynliga med en ljusstyrka 10 000 gånger svagare än solen. Schefer beskriver dock att det är en myt att vätgasbränder inte kan synas med blotta ögat som fått fäste även bland forskare: enligt Schefer strålar flammen mindre i synligt spektrum än kolväten, men den är fortfarande synlig. Vätgasflammen strålar enligt Schefer med ett blått ljus som inte beror på kolväterester i gasen eller koldioxid/kväve i luften – strålningen skapas alltså av vätgasen.

Till skillnad från kolväten och övriga brandfarliga gaser så bildas endast vatten när vätgas brinner. I det infraröda spektrumet strålar vätgas mestadels på grund av exciterade vattenmolekyler. För infrarött spektrum beskriver Arens m.fl. (2014) att vätgasens strålning ökar snabbt från 500 nm upp till 2 900 nm, med högsta värden runt 1 400, 1 800–2 000 samt 2 400–2 900 nm; det finns även två toppar vid 5 300 respektive 6 500–6 900 nm. Harper & Normans resultat visar strålningstoppar runt 1 000, 1 100–1 200, 1 300–1 400, 1 700–2 000, 2300 och 5500–6500 nm. Schefer m.fl. (2009) visar strålningstoppar vid 1 800–2 100, 2 200 samt 2 700 nm, där den sistnämnda toppen är dubbelt så stark som de övriga; de visar även att strålningen ökar vid cirka 5 500 nm samt mellan 6 500 och 8 500 nm. Yates m.fl. (1988) beskriver strålningen som starkast vid 1 000, 1 400 samt omkring 1 700–2 100 nm, där de senare två topparna är ungefär dubbelt så starka som den första.

Vätgasförbränningens emission går inte att använda utan att ta hänsyn till bakgrundsljuset eller atmosfärens absorption. Arens m.fl. (2014) visar intervallet 200–10 000 nm där strålningens styrka jämfört med bakgrundsljuset fluktuerar stort: strålningen är mer än 500 gånger starkare vid 300, 600, 2 000 och 2 400 nm; endast vid 550, 800, 1200 och 3500–4500 nm är strålningen mindre än 10 gånger starkare än bakgrundsljuset. Fishburne & Pergament (1979) presenterar vätgasens strålning efter påverkan av atmosfärens absorption från 2 000 till 4 000 nm: det är tydliga toppar vid 2 100, 2 400, 3 000 och 3 200 nm, utöver dessa sjunker nivåerna vid 2 250 och över 3 500 nm; endast vid 2 600–2 800 nm är intensiteten noll. Se tabell 29 för sammanfattning intensiteten efter påverkan av bakgrundsljus och atmosfärens absorption.

Tabell 29 – Sammanfattning av vätgasförbränningens strålningsintensitet efter påverkan av bakgrundsljus (Arens m.fl., 2014) och atmosfärens absorption (Fishburne & Pergament, 1979). En hög intensitet innebär att våglängden kan lämpa sig för detektion eftersom skillnaden är stor mot störande ljuskällor.

Våglängd	Strålningsintensitet	Källa
300 nm	Hög	Arens m.fl. (2014)
550 nm	Låg	Arens m.fl. (2014)
600 nm	Hög	Arens m.fl. (2014)
800 nm	Låg	Arens m.fl. (2014)
1 200 nm	Låg	Arens m.fl. (2014)
2 000 nm	Hög	Arens m.fl. (2014)
2 100 nm	Hög	Fishburne & Pergament (1979)
2 250 nm	Låg	Fishburne & Pergament (1979)
2 400 nm	Hög	Arens m.fl. (2014), Fishburne & Pergament (1979)
2 600–2 800 nm	Ingen strålning	Fishburne & Pergament (1979)
3 000 nm	Hög	Fishburne & Pergament (1979)
3 200 nm	Hög	Fishburne & Pergament (1979)
3 500–4 500 nm	Låg	Arens m.fl. (2014), Fishburne & Pergament (1979)

6.2.2 Flamdetektorer

Flamdetektorer använder sig av detektion av elektromagnetisk strålning vilket möjliggör en snabb branddetektion (Kushnir & Kopchak, 2021). Andra branddetektionsmetoder som exempelvis rök-, värme- och koldioxiddetektion är långsammare eftersom de detekterar efter att rökpartiklar nått detektorn eller temperaturen/koldioxidhalten intill detektorn ökat tillräckligt (Tsai & Young, 2006). Flamdetektorer har ingen sådan fördröjning eftersom tiden det tar för ljuset att färdas från flamman till detektorn är närmast obefintlig (Calisgan m.fl., 2021) vilket är en önskvärd egenskap i kritiska miljöer (Kranz, 1995).

En flamdetektor ska ha tillräckligt hög känslighet för flammor utan att vara känslig för störningar av andra strålningskällor för att på så sätt undvika fellarm (Middleton, 1983). Kushnir och Kopchak (2021) beskriver förekomsten av dessa externa strålningskällor som flamdetektorers främsta hinder och menar att källorna exempelvis kan vara artificiella ljuskällor, solljus, svetsning eller varma kroppar. Reflektion av strålningskällor kan vara ett problem för detektorerna eftersom det kan resultera i fellarm (Kushnir & Kopchak, 2021; Middleton, 1983).

Det finns huvudsakligen två sorters sensorer som används i flamdetektorer: de som detekterar UV-strålning och de som detekterar IR-strålning (Kranz, 1995; Middleton, 1983; Skippon & Short, 1993). De olika detektorerna besitter skilda styrkor och svagheter i förmågan att detektera flammor utan att fellarma för andra strålningskällor. Middleton (1983) menar att UV-detektorer främst används utomhus tack vare deras okänslighet för solljus. Detta beror på att UV-detektorer vanligtvis detekterar elektromagnetisk strålning från flammor i våglängderna 180–260 nm (Kushnir & Kopchak, 2021; Skippon & Short, 1993; Tsai & Young, 2006) och inom det spektrumet är strålning från solen begränsad eftersom ozonlagret i den övre atmosfären absorberar strålningen. UV-detektorer påverkas inte av vilket ämne som brinner och påverkas inte av flammans fluktuationer vilket gör de användbara för alla typer av bränder enligt Kushnir och Kopchak (2021). De menar även på att alla UV-detektorer verkar inom liknande spektrum eftersom den maximala UV-strålningen från samtliga flammor oavsett bränsle återfinns i ett intervall runt strålningstoppen vid våglängden 220 nm.

Enbart cirka 10 % av flammans strålning avges som UV-ljus, UV-detektorerna måste därför ha hög känslighet (Middleton, 1983). Middleton menar att den höga känsligheten tillsammans med faktumet att svetsning avger mycket UV-strålning innebär att UV-detektorer har stor benägenhet att fellarma till följd av svetsning vilket även Skippon och Short (1993) framhäver. Fler UV-strålningskällor som kan innebära fellarm är exempelvis: blixtnedslag, gasurladdningslampor, ljusbågar, joniserande strålning och elektrostatiska urladdningar (Kushnir & Kopchak, 2021). Vidare beskriver Kushnir och Kopchak även att stora mängder rök, damm eller vattenånga mellan flamma och detektor kan innebära att UV-strålningen inte når detektorn vilket innebär att UV-detektorer inte är helt pålitliga i påfrestande miljöer.

Till skillnad från UV-detektorer, som verkar inom ett visst spektrum av UV-strålningen oberoende av bränsle, kan IR-detektorer verka inom olika delar av IR-strålningens spektrum (Middleton, 1983). Olika molekyler strålar vid olika våglängder när de värms upp och beroende på vilka brandfarliga gaser som hanteras och deras produkter behöver detektorn anpassas till att detektera IR-strålning vid särskilda våglängder. Eftersom produkterna vid förbränning är samma molekyler som absorberar solljuset i atmosfären har IR-detektorer goda möjligheter att detektera en flamma utan att störas av solljuset. Atmosfärens förmåga att absorbera solljus inom dessa våglängder innebär dock enligt Powell m.fl. (1987) att ett större avstånd mellan detektor och flamma minskar strålningen som når detektorn.

IR-detektorer används ofta för att detektera kolvätebränder (Kushnir & Kopchak, 2021; Powell m.fl., 1987) och de vanligaste brandfarliga gaserna är kolväten. Kolväten kan användas som utgångspunkt för jämförelse av flamdetektions applicerbarhet på vätgas jämfört med andra brandfarliga gaser. Produkterna vid förbränning av kolväten är koldioxid och vatten som båda avger mycket strålning i IR-spektrumet när de värms upp. För att detektera en kolvätebrand används vanligtvis sensorer som detekterar i intervall runt strålningstoppen vid våglängden 4 300 nm där uppvärmd koldioxid avger IR-strålning. Detektorer som använder sig av intervall runt strålningstoppen vid våglängden 2 700-2 800 nm, utgör enligt Kushnir och Kopchak (2021) en liten andel av marknaden eftersom det där finns mer yttre störningar.

De enklaste IR-flamdetektorerna består av en sensor som enbart analyserar vid en specifik våglängd, vanligtvis 4 300 nm för kolväten. Sådana IR-detektorer som bara analyserar vid ett våglängdsintervall kan hantera bakgrundsljus från solen men är benägna att fellarma på grund av svartkroppstrålning från varma kroppar (Kranz, 1995). Mer avancerade IR-detektorer analyserar strålning vid flera våglängder samtidigt, genom att detektera inom flera våglängder samtidigt analyseras indata från olika delar av spektrumet för att öka noggrannheten i detektionen och minska antalet fellarm (Kranz, 1995; Shekhar m.fl., 2013; Skippon & Short, 1993). Kushnir och Kopchak (2021) exemplifierar en detektor som verkar i flera våglängder genom att beskriva en flamdetektor med tre IR-sensorer. Författarna beskriver att en av sensorerna detekterar våglängder där uppvärmd koldioxid avger mycket IR-strålning (4 000–4 800 nm) och de andra sensorerna analyserar solljus (700–1 000 nm) respektive svartkroppsstrålning från varma kroppar (5 100–6 000 nm). Genom att analysera spektrum både där flammen förväntas stråla och där störningskällor förväntas stråla kan fellarm undvikas (Kranz, 1995).

Det finns även metoder där man använder sig av detektion inom både IR- och UV-spektrumet samtidigt vilket resulterar i god förmåga att undvika fellarm (Song m.fl., 2019; Tsai & Young, 2006). Song m.fl. (2019) beskriver en detektor som använder sig av en UV-detektor och två IR-detektorer: UV-detektorn används för att detektera stora flammor, de två IR-detektorerna bidrar till att detektionen sker snabbt, och alla tre detektorer bidrar till att skilja flammans strålning från bakgrundstrålning. Skippon och Short (1993) menar dock att UV/IR-detektorer inte är att föredra framför enkla IR-detektorer och hävdar även att IR-detektorer som detekterar inom två olika intervall är mindre känsliga för gasbränder än enkla IR-detektorer.

Huseynov m.fl. (2005) beskriver svårigheten att skilja flammornas strålning från bakgrundstrålning och menar att detta är vad som driver utvecklingen mot att flamdetektorer ska analysera flera våglängder. Författarna menar att flera sensorer vid olika våglängder kan vara svårt att implementera och föreslår en alternativ lösning där en flamdetektor använder sig av ett neuronät som med hjälp av algoritmer identifierar flammor. En detektor som använder den presenterade lösningen med neuronät kan enligt Huseynov m.fl. (2005) detektera flammor på avstånd upp till 76 meter och har en väldigt god förmåga att bortse från andra strålningskällor. Kushnir och Kopchak (2021) menar även de att neuronät resulterar i smartare flamdetektorer som innebär bättre detektion och färre fellarm.

6.2.3 Flamdetektion av vätgas

De vanligaste gasformiga bränslena som vätgas kan tänkas ersätta är de brandfarliga gaserna som består av kolvätekedjor, främst metan (natur-/biogas) och propan (gasol). För dessa gaser finns etablerade flamdetektorer som detekterar strålningen från den uppvärmda koldioxiden som avges vid förbränning. När vätgas brinner bildas dock ingen koldioxid och därför finns det inga strålningstoppar i våglängderna där koldioxid strålar (exempelvis 4 300 nm).

Vid förbränning av vätgas bildas endast vatten, dessa molekyler värms upp och strålar på samma sätt som för kolväten. Litteraturstudien visar att vätgasflammor strålar med hög intensitet i flera våglängder även efter påverkan av bakgrundsljus och atmosfärens absorption, se tabell 29 ovan. Genom att använda flamdetektorer som har sensorer i våglängder där vätgasflammor strålar kan vätgasflammor detekteras. För att undvika fellarm bör man utifrån litteraturen använda sig av detektion inom flera delar av spektrumet samtidigt.

Två flamdetektorer på den kommersiella marknaden styrker resultatet från litteraturstudien. MSA (2021) har tagit fram en flamdetektor anpassad för vätgas som använder sig av en kombination två sensorer: en UV- och en IR-sensor. UV sensorn verkar i intervallet 185–260 nm vilket ligger i linje med vad Kushnir och Kopchak (2021) presenterar kring att alla flammor strålar i ett intervall runt 220 nm. IR sensorn verkar vid 2 950 nm vilket överensstämmer med vad flera av källorna i litteraturstudien påpekar angående strålningen från vätgasflammor och vattnets strålningsspektrum, se avsnitt 6.2.1. Det-Tronics (2019, 2020) har i sin detektor till skillnad från MSA använt sig av flera IR-sensorer i spektrumet 2 400–3 500 nm tillsammans med algoritmer för att optimera detektion av vätgasflammor och samtidigt minimera falsklarm. Det-Tronics detektor fokuserar enligt tillverkaren på den infraröda strålningen som avges från vatten vilket styrker litteraturstudiens resultat.

En fördel med UV/IR-detektorer är UV-sensors okänslighet för solljus, men Det-Tronics (2020) menar att tekniken med flera sensorer och mjukvaruanalys innebär att solljus samt andra ljuskällor inte orsakar fellarm. Detta ligger i linje med vad litteraturstudien visar angående detektorer som använder sig av algoritmer för att skilja flammans strålning från andra ljuskällors strålning.

6.3 Laborationsförsök

Under laborationsförsöken antändes ett vätgasutsläpp vilket skapade en jetflamma. Flamman antändes vid 100 bars tryck med en håldiameter på 1,2 mm, se avsnitt 3.3.

Flammans intensitet bedömdes både visuellt och med värmekamera under utsläppet för att ge en bredare uppfattning av vätgasflammors egenskaper. Värmekameran var av typ FLIR E60 och använde sig av IR-strålning i intervallet 7 500–13 000 nm, mycket längre våglängder än de som flamdetektorer detekterar.

Figur 18 presenterar ögonblicksbilder av jetflamman i ett tidigt skede av utsläppet vid 65 bars tryck medan figur 19 visar ett senare skede av utsläppet vid 20 bars tryck. Figureerna visar att flammans intensitet var högre och att flammans storlek var större vid det högre trycket. Figureerna visar även att flammen var synlig och strålar tydligt med orange färg vilket innebär att den avger strålning inom det synliga spektrumet. Värmekameran urskilde på ett tydligt sätt jetflamman från omgivningen både vid 65 bar och vid 20 bar vilket innebär att vätgasflammen strålade inom våglängderna 7 500–13 000 nm, intervallet som värmekameran använder.



Figur 18 – Jetflamma i tidigt skede av utsläppet, 65 bars tryck. Vänstra delen av figuren visar hur jetflamman betraktades visuellt och högra delen visar hur jetflamman betraktades genom värmekameran.



Figur 19 – Jetflamma i sent skede av utsläppet, 20 bars tryck. Vänstra delen av figuren visar hur jetflamman betraktades visuellt och högra delen visar hur jetflamman betraktades genom värmekameran.

6.4 Diskussion

Laborationsförsöket med jetflamma visade en tydligt synlig jetflamma i orange färg. Eftersom flammen syntes med blotta ögat innebär det att den avger strålning inom det synliga spektrumet vilket motsäger flera av rapportens källor som beskriver vätgasflammen som osynlig. Schefer m.fl. (2009) påstår dock att det är en myt att vätgasflammen inte går att se med blotta ögat, vilket bekräftas av laborationsförsöket. En aspekt som kan ha bidragit till flammans synlighet är att försöket genomfördes efter att solen hade gått ner. Det är möjligt att flammen hade varit mindre synlig i dagsljus, dock återfanns stark belysning i form av strålkastare i bakgrunden under försöket. Dessutom upplevdes flammen stråla med hög intensitet av synligt ljus vilket antyder att den hade varit synlig även i dagsljus. Enligt Schefer strålar vätgasflammar främst i blått ljus, den orangea flammen från laborationsförsöket kan alltså bero på annat än vätgasens egen strålning. Förklaringar kan vara föroreningar i gasen såsom kolväten eller natrium, eller att koldioxid eller kvävgas i atmosfären exciterades och lyste.

Laborationsförsöket genomfördes vid mindre än 100 bars tryck vilket skiljer sig mycket från de maximala tryck vid vilka vätgas hanteras på bland annat tankstationer (900 bar). Försöket visade att intensiteten för flammen var större vid ett högre tryck och jetflammar som uppstår vid vätgashantering med tryck upp till 900 bar bör därför resultera i en mycket större intensitet. Eftersom jetflammen även vid 20 bar kunde urskiljas tydligt från omgivningen med värmekameran, se figur 19, bör en jetflamma som skapats vid flera hundra bars tryck inte vara svår att identifiera med en flamdetektor som ser flammen och som verkar vid rätt våglängder (värmekameran verkade inte inom de våglängder som utifrån litteraturstudien är optimala för vätgasdetektion). Den större utmaningen kan tänkas vara att konstruera flamdetektorer som inte fellarmar på grund av andra strålningskällor.

Under försöken med ljuddetektion genomfördes även laborationen för flamdetektion men eftersom försöken främst syftade till att spela in ljud genomfördes inte datainsamling av jetflammans strålningsspektrum. Ett mer omfattande laborationsförsök för flamdetektion som undersöker strålningen som avges från en vätgasflamma hade kunnat jämföras med litteraturstudien. Djupare laborationsförsök hade även kunnat testa flamdetektorer specialiserade på vätgas, där aktiveringstid, detektionsavstånd, vinkelberoende och känslighet för fellarm undersöks på samma sätt som genomfördes för ljuddetektorer.

Litteraturstudien visar att en kombination av flera sensorer alternativt flera sammankopplade flamdetektorer som verkar inom olika våglängder är ett sätt att effektivt undvika fellarm. Exempel från marknaden visar att flamdetektorer för vätgas kan verka inom enbart IR-spektrumet eller inom både IR- och UV-spektrumet. Våglängderna som används av MSA:s (2021) flamdetektor (185–260 och 2950 nm) stämmer överens med litteraturen både för UV- och IR-strålningen. Det-Tronics (2020) flamdetektor verkar i våglängder (2 400–3 500 nm) där litteraturen visar att vätgasflammar strålar med hög intensitet men även i våglängder där vätgasflammar inte förväntas stråla, se tabell 29 ovan. Eftersom detektorn använder sig av flera sensorer och algoritmer kan det tänkas att de våglängder där vätgas inte förväntas stråla används för att klassificera strålningskällan som icke-vätgas och på så sätt undvika fellarm.

Litteraturen visar även att vätgas strålar i våglängder som inte används av de två detektorerna, främst 600 nm och 2 000 nm, se tabell 29 ovan. Våglängder vid 600 nm ligger inom det synliga spektrumet vilket innebär att lampor lyser i de våglängderna, detta kan störa sensorn i detektorn och leda till fellarm. Litteraturstudien har inte visat något resultat som antyder att 2 000 nm inte skulle vara lämpligt för flamdetektion av vätgas. De två detektorerna är endast exempel från marknaden och det kan vara så att andra detektorer använder sig av de dessa våglängder.

Resultatet från litteraturstudien visar att vatten i atmosfären absorberar strålning inom liknande våglängder som vätgasflammorna strålar i IR-spektrumet, detta beror på att det är den uppvärmda produkten vatten som avger strålning. Fenomenet kan innebära att mycket vattenånga i luften blir ett problem för flamdetektorer som använder sig av IR-strålning vid dessa våglängder. Vid flamdetektion av andra brandfarliga gaser (kolväten) där det är strålning från den avgivna och uppvärmda koldioxiden som detekteras istället för strålning från vatten är detta inte ett problem. Det kan dock finnas en variation av mängden koldioxid i luften men den är i så fall liten i jämförelse med vattnets variation och absorberar därför inte lika mycket av strålningen från flammen.

Resultaten och diskussionerna visar att flamdetektion av vätgas fungerar bra men att ingenting i vätgasens egenskaper eller hantering innebär en fördel vid flamdetektion jämfört med andra brandfarliga gaser. Flamdetektorer med sensorer som detekterar vid rätt våglängder behöver väljas för att vätgasflammar ska kunna detekteras.

7 Felkällor

I avsnittet presenteras felkällor som kan ha påverkat analyserna av de två riskreducerande åtgärderna ljuddetektion och flamdetektion.

Litteraturstudierna genomfördes med hjälp av Scopus databas där sökord användes för att få fram bästa möjliga träffar på vetenskapliga artiklar som kunde hjälpa författarna att analysera de riskreducerande åtgärderna. Resultaten från litteraturstudierna har formats av de sökord och den databas som användes, med andra sökord eller användning av andra databaser hade andra publikationer erhållits. Dessa hade kunnat innehålla annan information.

Alla källor som inkluderas i litteraturstudierna var inte kvalitetsgranskade eftersom antalet användbara artiklar upplevdes vara lågt. Under litteraturstudien har artiklarna utan kvalitetsgranskning lästs med en mer kritisk inställning än övriga artiklar. Innehåll i artiklarna har även i högsta möjliga utsträckning styrkts med kvalitetsgranskade artiklar, alternativt har det tydliggjorts att åsikten är något som den aktuella författaren hävdar. Resultaten från laborationsförsöken jämfördes med litteraturstudien vilket ytterligare minskar sannolikheten att felaktiga fakta från de icke kvalitetsgranskade artiklarna påverkar slutsatser.

I litteraturstudierna, särskilt den för flamdetektion, är flera av de inkluderade artiklarna skrivna för mer än 20 år sedan. Detta kan innebära att en del av den fakta som presenterats i artiklarna är föråldrad. Under litteraturstudien har äldre artiklar lästs med mer kritisk inställning, särskilt delar av artiklarna som behandlar sådant som förmodligen ändrats med tiden, exempelvis tekniska lösningar för detektorer. Forskning från 70- och 80-tal kan vara av samma kvalitet som dagens forskning, kanske även bättre, och många viktiga resultat erhöles från dessa artiklar. Strålningsspektrum från olika flammor och absorptionsspektrum för molekyler är sådant som inte har ändrats med tiden, för sådana data verkar det ha funnits tillräckligt bra mätinstrument även för 30–40 år sedan.

I laborationsförsöken uppstod flera felkällor som kan ha påverkat resultaten. I samtliga försök för ljuddetektion spelades manometern in med en mobilkamera som sedan avlästes. Kamerans placering tillsammans med manometerns utformning gjorde det svårt att bedöma trycken med större noggrannhet än 5 bar. Trycket sjönk dessutom mycket snabbt i början av försöken vilket försvårade avläsningen. Utifrån tryckavläsningen beräknades effektiv hålstorlek med hjälp av teoretiska utsläpp, dessa framräknade hålstorlekar beror på precisionen i tryckavläsningen.

Mikrofoner samt avståndsmarkeringar placerades med hjälp av måttband, och mikrofonernas membran pekades med ögonmått mot utsläppet. När ljuddetektorn transporterades framåt mot utsläppet varierade vinkel och höjd eftersom detektorn bars för hand. Dessa variationer kan ha resulterat i att den faktiska vinkeln skiljde sig från de tänkta vinklarna.

Ljuddetektorns detektionsavstånd bedömdes utifrån fördröjningstider för pålarm (5 s) respektive avlarm (1 s). Med hjälp av inspelad video beräknades positionen ljuddetektorn befann sig vid fem sekunder, respektive en sekund, innan larm. Eftersom detektorn ibland larmade på och av flera gånger inom ett femsekundersintervall kan detektorn använda algoritmer för att bestämma när detektion sker, det beror alltså inte bara på att detektorn ska ha uppmätt en ljudnivå över detektionsgränsen de senaste fem sekunderna. Dessa (eventuella) algoritmer kan ha påverkat tiden från uppnådd ljudnivå till larm, och därmed det uppmätta detektionsavståndet.

Detektionsavstånd togs fram i försöken genom att förflytta detektorn i utsläppets riktning med mikrofonen riktad mot utsläppet fram till pålarm och sedan förflytta den ifrån utsläppet till avlarm. Detektorn är konstruerad för att vara fast monterad och riktad ner mot marken.

Detektorn är förmodligen inte heller konstruerad att larma på och av på det sätt som försöken krävde för att få detektionsavstånd vid olika tryck. Dessa faktorer kan ha inneburit att detektionsavståndet som erhöles inte motsvarar detektorns detektionsavstånd i dess tänkta miljö.

De uppmätta ljudnivåerna från ljudinspelningarna kan i vissa fall skilja sig från verkligheten. I vissa av ljudinspelningarna från försöken nådde förstärkaren maximal ljudnivå på inspelningen vilket resulterade i att ljudsignalen klippte, ljudnivån kan alltså vara högre vid de högsta trycken än vad resultatet visar för den större hålstorleken. Mikrofonerna är endast kalibrerade upp till 30 kHz (se bilaga), vilket innebär att ljudnivåerna som uppmätts i frekvenser över 30 kHz inte är säkerställda. Bakgrundsljudet som läckageljuden jämförs med berodde både på vind och bilar och förändrades med tiden vilket kan ha påverkat den resulterande ljudnivån, framför allt i frekvenser under 10 kHz. Ljud från utsläppet kan även ha reflekterats mot omgivningen och studsat tillbaka till mikrofoner eller detektor, vilket kan ha påverkat den uppmätta ljudnivån.

I laborationsförsöket var munstycket inte tätt vilket innebar att en mindre mängd vätgas flödade ut från munstyckets ovansida vilket skapade en mindre jetflamma riktad rakt uppåt, se figur 18 och figur 19. Denna felkälla påverkade förmodligen flammans storlek och intensitet eftersom ett helt tätt munstycke hade inneburit ett större flöde i utsläppet riktning. Vid ett mer omfattande laborationsförsök för flamdetektion hade detta varit problematiskt men för jämförelse mellan lägre och högre tryck samt observation visuellt och med värmekamera var påverkan inte stor.

Det otäta munstycket bör även ha inneburit en påverkan på detektionsmöjligheterna och ljudinspelningen för de försök där munstycket användes eftersom vätgasen läckte ut även ovanför munstycket. En annan faktor som kan ha påverkat detektionsmöjligheter och ljudinspelningen är att utsläppets riktning för det verkliga läckaget med hålstorlek 0,09 mm i försöksriggen inte var säkerställt. Placeringen av läckaget undersöktes med såpvatten men den exakta riktningen gick inte att säkerställa.

Laborationsförsöken för flamdetektion gav en ökad förståelse för vätagasjetflammors egenskaper. Resultaten jämfördes inte med litteraturstudiens resultat om hur, och i vilka våglängder, som flamdetektorer verkar. Eftersom resultaten från litteraturstudien inte kunde jämföras med laborationsförsöket på samma sätt som för ljuddetektion kan felaktig information i litteraturstudien ha påverkat resultatet mer än för ljuddetektion.

Dessa felkällor kan alla påverka arbetets resultat, men eftersom litteraturstudierna jämförts med laborationsförsök bör felkällorna inte påverka arbetet på så sätt att slutsatsen riskerar att vara felaktig.

8 Slutsats

I avsnittet presenteras de slutsatser som erhållits med utgångspunkt i arbetets frågeställningar.

1. Vilka riskreducerande åtgärder kan användas vid läckage av brandfarliga gaser?

Utifrån kartläggningen av möjliga riskreducerande åtgärder för läckage av brandfarliga gaser erhöles följande åtgärder: gasdetektion, luktsättning, ljuddetektion, begränsning av antändningskällor, ventilation, inertering, hypoxic air-system, värmedetektion, flamdetektion, säkerhetsavstånd, fysiska barriärer, tryckavlastning och sprinklersystem.

2. Vilka av de identifierade riskreducerande åtgärderna är utifrån vätgasens egenskaper och hanteringsförhållanden lämpliga för djupare analys?

Utifrån vätgasens egenskaper och förhållandena vid vätgashantering bedöms alla riskreducerande åtgärder förutom luktsättning och värmedetektion vara lämpliga för djupare analys. Djupare analyser av åtgärderna krävs för att bedöma deras applicerbarhet.

3. Hur applicerbara är analyserade riskreducerande åtgärder för vätgasläckage?

Ljuddetektion av vätgas bör utifrån resultaten av litteraturstudie och laborationsförsök fungera likvärdigt eller bättre än ljuddetektion av övriga brandfarliga gaser. Vätgas som hanteras under höga tryck skapar höga ljudnivåer i ultraljudsfrekvenser även för små läckage, vilket gynnar detektion med hjälp av ljuddetektorer. Litteraturstudiens resultat visar att vätgas har gynnsamma egenskaper för ljuddetektion jämfört med andra brandfarliga gaser.

Flamdetektion av vätgas bör utifrån resultaten av litteraturstudie och laborationsförsök fungera likvärdigt flamdetektion av övriga brandfarliga gaser. Trots att vätgas strålar med färre detekteringsbara våglängder än andra brandfarliga gaser har flamdetektorer som verkar vid våglängder anpassade för vätgasens strålningsspektrum god förmåga att detektera vätgasflammar.

9 Framtida forskning

Under arbetets gång har flera möjligheter till framtida forskning upptäckts men valts att inte inkluderas eftersom arbetets tidsomfattning inte varit tillräcklig. I avsnittet presenteras möjligheter till fortsatt arbete inom riskbehandling för vätgashantering.

I kartläggningen av de riskreducerande åtgärder i avsnitt 4 upptäcktes flera möjligheter till djupare analys som inte genomfördes. Med motsvarande metod som använts i arbetet kan litteraturstudier genomföras för samtliga riskreducerande åtgärder för att undersöka deras applicerbarhet vid vätgashantering. Sådan framtida forskning kan tillsammans med de två analyserna av åtgärderna ljuddetektion och flamdetektion från denna rapport samlas i ett kompendium för att ge en bra överblick över möjliga riskreducerande åtgärder för läckage vid vätgashantering.

Avgränsningen till att studera ett inträffat läckage har inneburit att flera riskreducerande åtgärder inte kartlagts. Vid ett framtida arbete kan motsvarande kartläggningsstudie göras där en annan grundhändelse än inträffat läckage används som utgångspunkt. Utifrån en annan grundhändelse kan andra riskreducerande åtgärder kartläggas och analyseras djupare. Ett eventuellt kompendium med riskreducerande åtgärder vid vätgashantering hade kunnat inkludera även andra grundhändelser. Felfungerande utrustning, jetflamma och tankruptur är exempel på andra grundhändelser.

Författarna vill även belysa möjligheter till framtida forskning inom de fördjupade analyser som genomfördes. För den riskreducerande åtgärden flamdetektion kan den genomförda litteraturstudien kompletteras med ett laborationsförsök likt det som genomfördes för ljuddetektion där mer omfattande datainsamling utförs. Ett sådant laborationsförsök hade kunnat undersöka vätgasflammans strålning inom olika delar av det elektromagnetiska spektrumet för att bekräfta eller dementera litteraturstudiens resultat. Försöket hade även kunnat undersöka kommersiella vätgasflamdetektorers detektionsegenskaper och jämföra olika typer av detektorer med varandra. Vid ett sådant försök kan detektionsavstånd och andra variabler undersökas på liknande sätt som för ljuddetektorn.

För den riskreducerande åtgärden ljuddetektion kan framtida forskning återskapa laborationsförsöken med större noggrannhet, se diskussion kring felkällor i avsnitt 7. Försöket hade även kunnat inkludera försök där en eller flera andra gaser testas. Ljudnivåer och detektionsavstånd för tyngre gaser hade kunnat bidra till bättre underlag för utvärdering av åtgärdens applicerbarhet för vätgas jämfört med andra brandfarliga gaser. En annan intressant aspekt som hade kunnat undersökas vid ett framtida försök är hur ljudnivån påverkas av avståndet, flera mikrofoner hade kunnat placeras i samma vinkel i förhållande till läckaget med olika avstånd vilket hade kunnat resultera i ett förhållande mellan ljudnivå och avstånd vid olika tryck och hålstorlekar. Att undersöka hur detektionsmöjligheterna påverkas av detektorns riktning till läckaget kan innebära användbara data inför installation av detektorer.

10 Referenser

- Almgren, R. (2007). *Räddningstjänst vid olycka med gaser*. Räddningsverket.
- Arbetsmiljöverket. (2016). *Arbetsmiljöverkets föreskrifter om utrustning och skyddssystem som är avsedda för användning i potentiellt explosiva atmosfärer* (AFS 2016:4).
- Arbetsmiljöverket. (2020). *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om arbetsplatsens utformning* (AFS 2020:1).
- Arens, E. E., Youngquist, R. C., & Starr, S. O. (2014). Intensity calibrated hydrogen flame spectrum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 9545–9551. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.043>
- Bengtsson, L. (1999). *Övertändning, backdraft och brandgasexplosion sett ur räddningstjänstens perspektiv*. Lund University.
- Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., & van Wingerden, K. (1997). Gas explosion handbook. *Journal of Hazardous Materials*, 52(1), 1–150. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)81620-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)81620-2)
- Brandskyddsföreningen. (u.å.). *Sprinkler*. Brandskyddsföreningen. Hämtad 05 oktober 2021, från <https://www.brandskyddsforeningen.se/normer--riktlinjer/slackanlaggningar/sprinkler/>
- Brehmer, B. (2013). *Insatsledning: Ledningsvetenskap hjälper dig att peka åt rätt håll*. Försvarshögskolan.
- Calisgan, S. D., Rajaram, V., Kang, S., Risso, A., Qian, Z., & Rinaldi, M. (2021). Zero-Power Flame Detector with Wide Field-of-View Based on Plasmonically-Enhanced Micromechanical Photoswitch. *2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)*, 263–266. <https://doi.org/10.1109/Transducers50396.2021.9495578>
- Cenex. (2021). *An Introduction to Hydrogen Fuel Cell electric Vehicles and Refuelling Stations*. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Intro-to-hydrogen-1.pdf>
- Cha, S.-W., Roh, T.-S., & Lee, H. J. (2021). Effect of opening area on the suppression of self-ignition of high-pressure hydrogen gas leaking in the air by an extension tube. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(7), 5904–5915. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.132>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Deimer, A. (2000). *Risikanalytisk av vätgas – och vätgasfabriken vid Ringhals*. Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Det-Tronics. (2019). *Hydrogen and fire safety: Detecting the most flammable element on earth*. https://www.det-tronics.com/Content/Documents/Det-Tronics-hydrogen-and-fire-safety-detection-white-paper_74-1014.pdf

- Det-Tronics. (2020). *Specification Data—X3302 Multispectrum IR Flame Detector*. [https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1208-2.3-\(FlexSonic-Acoustic-Specifications\).pdf](https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1208-2.3-(FlexSonic-Acoustic-Specifications).pdf)
- Det-Tronics. (2021). *FlexSonic® Acoustic Gas Leak Detector—Instructions*. [https://www.det-tronics.com/content/documents/95-8657-4.5-\(FlexSonic-AC100-ATX10-Instruction-Manual\).pdf](https://www.det-tronics.com/content/documents/95-8657-4.5-(FlexSonic-AC100-ATX10-Instruction-Manual).pdf)
- Dyhr, K. (2001). *Antändningsrisker genom statisk elektricitet vid vattenbegjutning av gasolutsläpp*. Räddningsverket.
- Engelhaupt, D. E., Reardon, P. J., Blackwell, L., Warden, L., & Ramsey, B. D. (2005). *Autonomous long-range open area fire detection and reporting* (G. R. Peacock, D. D. Burleigh, & J. J. Miles, Red.; s. 164). <https://doi.org/10.1117/12.605926>
- European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf
- European Commission. (2021). *Equipment for potentially explosive atmospheres (ATEX) | Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. European Commission, official website. <https://ec.europa.eu/growth/sectors/mechanical-engineering/atex/>
- Fink, J. (2016). Safety Aspects for Pipelines. I *Guide to the Practical Use of Chemicals in Refineries and Pipelines* (s. 131–154). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805412-3.00008-8>
- Fishburne, E. S., & Pergament, H. S. (1979). The dynamics and radiant intensity of large hydrogen flames. *Symposium (International) on Combustion*, 17(1), 1063–1073. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(79\)80102-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(79)80102-2)
- Fuhs, S., Hu, R., & McClure, G. (1993, juli 1). *Development of the Flame Detector for Space Station Freedom*. International Conference On Environmental Systems. <https://doi.org/10.4271/932106>
- General Monitors. (u.å.). *Observer-i Ultrasonic Gas Leak Detector Data Sheet*. Hämtad 01 november 2021, från https://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/Gassonic%20Observer-i%20Data%20Sheet_EN
- Groth, K. M., & Hecht, E. S. (2017). HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7485–7493. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.002>
- Guirao, C. M., Knystautas, R., & Lee, J. H. (1989). *A summary of hydrogen-air detonation experiments* (NUREG/CR-4961, SAND-87-7128, 6066054). <https://doi.org/10.2172/6066054>
- Harper, B., & Norman, T. (1990). *A Hydrogen Fire Detection System Using A Thermal Imaging System And Its Application To Space Launch Vehicles* (A. H. Lettington, Red.). <https://doi.org/10.1117/12.969703>

- Hua, T. Q., Ahluwalia, R. K., Peng, J.-K., Kromer, M., Lasher, S., McKenney, K., Law, K., & Sinha, J. (2011). Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), 3037–3049. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.090>
- Huseynov, J., Boger, Z., Shubinsky, G., & Baliga, S. (2005). Optical flame detection using large-scale artificial neural networks. *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2005.*, 3, 1959–1964. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2005.1556180>
- ISO. (2018). *Risk management—Guidelines (ISO Standard No. 31000:2018)*. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- Karlsruher Institut für Technologie. (u.å.). *Beräkningsmodell adiabatisk blowdown*. Hämtad 02 december 2021, från <https://elab-prod.iket.kit.edu/>
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. CRC Press.
- Kotani, M., Katsura, M., & Ozawa, S. (2004). Detection of gas leakage sound using modular neural networks for unknown environments. *Neurocomputing*, 62, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2004.06.002>
- Kranz, C. (1995). A new flame detection method for two channels infrared flame detectors. *Proceedings The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 29th Annual 1995 International Carnahan Conference on Security Technology*, 209–213. <https://doi.org/10.1109/CCST.1995.524914>
- Kushnir, A., & Kopchak, B. (2021). Development of Multiband Flame Detector with Fuzzy Correction Block. *2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 58–63. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468075>
- Leach, S. J., & Bloomfield, D. P. (1973). Ventilation in relation to toxic and flammable gases in buildings. *Building Science*, 8(4), 289–310. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(73\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0007-3628(73)90015-7)
- Leighton, T. G. (2007). What is ultrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 93(1–3), 3–83. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026>
- Maeda, K., & Tamura, Y. (2017). Characteristics of hydrogen leakage sound from a fuel-cell vehicle by hearing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7331–7339. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.220>
- Malm, H. (1998). Using Ultrasonic Instrumentation To Enhance Plant Maintenance. *Plant Engineering*, 52(2), 75–77.
- Middleton, J. F. (1983). Developments in flame detectors. *Fire Safety Journal*, 6(3), 175–182. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(83\)90068-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(83)90068-1)
- Molkov, V. (2012). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering*. bookboon.com.

- Moon, C., Brown, W. C., Mellen, S., Frenz, E., & Pickering, D. J. (2009, maj 19). *Ultrasound Techniques for Leak Detection*. SAE 2009 Noise and Vibration Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2159>
- Mostinsky, I. L. (2006). *Diffusion Coefficient*. A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering: AtoZ. 10.1615/AtoZ.d.diffusion_coefficient
- Mouli-Castillo, J., Orr, G., Thomas, J., Hardy, N., Crowther, M., Haszeldine, R. S., Wheeldon, M., & McIntosh, A. (2021). A comparative study of odorants for gas escape detection of natural gas and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14881–14893. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.211>
- MSA. (2012). *Ultrasonic Gas Leak Detection—What is it and How Does it Work?*
- MSA. (2021). *FL500-H2 UV/IR Flame Detector Data Sheet*.
- MSB. (u.å.). *RIB - beslutsstöd till räddningstjänst*. Hämtad 13 september 2021, från <https://www.msb.se/sv/verktyg--tjanster/RIB/>
- MSB. (2009). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om ledningssystem för naturgas* (MSBFS 2009:7).
- MSB. (2020a). *Hantering av brandfarlig gas för yrkesmässig verksamhet*.
- MSB. (2020b). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap föreskrifter om hantering av brandfarlig gas och brandfarliga aerosoler* (MSBFS 2020:1).
- Naranjo, E. (2009). Combining detection systems improves safety. *Hydrocarbon Processing*.
- Naranjo, E., & Baliga, S. (2009a). *A Review of Methods for Detection of Large Scale Releases of Carbon Dioxide*. 55th International Instrumentation Symposium, Texas.
- Naranjo, E., & Baliga, S. (2009b). Expanding the Use of Ultrasonic Gas Leak Detectors: A Review of Gas Release Characteristics for Adequate Detection. *Gases & Instrumentation*, 7.
- Nilsson, E., Johansson, A.-C., Brunskog, J., Sjökvist, L.-G., & Holmberg, D. (2005). *Grundläggande Akustik* (3:e uppl.).
- Nilsson, M., & van Hees, P. (2014). Advantages and challenges with using hypoxic air venting as fire protection. *Fire and Materials*, 38(5), 559–575. <https://doi.org/10.1002/fam.2197>
- Norén, C., & Thunell, J. (2002). *Svavelfri och svavelfattig odorisering av gasol och naturgas* (SGC A26). Svenskt Gastekniskt Center AB.
- Powell, B. D., Spring, D. J., & Adams, S. J. (1987). *An Infrared Flame Detector With Fire-Ranging Ability* (H. M. Lambertson, Red.). <https://doi.org/10.1117/12.941439>
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(2), 234–243. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313353>

- Rigas, F., & Sklavounos, S. (2005). Evaluation of hazards associated with hydrogen storage facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(13–14), 1501–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.06.004>
- Saunoris, M., Augutis, V., & Gailius, D. (2003). *Application of Acoustical Method for the Detection of Gas Leaks*. Tenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV10, Stockholm.
- Schefer, R. W., Kulatilaka, W. D., Patterson, B. D., & Settersten, T. B. (2009). Visible emission of hydrogen flames. *Combustion and Flame*, 156(6), 1234–1241. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.011>
- Shekhar, H., Kumar, S. J., & Rajawat, P. S. (2013). Multi Infrared (IR) Flame Detector for Tangential Fired Boiler. I V. V. Das & Y. Chaba (Red.), *Mobile Communication and Power Engineering* (Vol. 296, s. 545–548). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7_84
- Shibata, A., Konishi, M., Abe, Y., Hasegawa, R., Watanabe, M., & Kamijo, H. (2008). Neuro based acoustic diagnosis of gas leakage in pipeline. *2008 SICE Annual Conference*, 283–287. <https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654664>
- Sizeland, E. (2014). Ultrasonic devices improve gas leak detection in challenging environments. *World Oil*, 235(10), 133–135.
- Skippon, S. M., & Short, R. T. (1993). Suitability of flame detectors for offshore applications. *Fire Safety Journal*, 21(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90002-8)
- Song, W., Zhang, L., Zheng, Z., Wang, G., & Zhang, J. (2019). Solution of false alarm and slow response in flame detector. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 35(2), 174–178. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7985.2019.02.005>
- Statens räddningsverk. (2004). *Statens räddningsverks föreskrifter om explosionsfarlig miljö vid hantering av brandfarliga gaser och vätskor* (SRVFS 2004:7).
- Sun, K., Pan, X., Li, Z., & Ma, J. (2014). Risk analysis on mobile hydrogen refueling stations in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20411–20419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.098>
- Sun, W., Liu, L., Li, Y., Huang, C., Chen, X., & Feng, M. (2021). Insight into vented explosion mechanism and premixed flame dynamics in linked vessels: Influence of membrane thickness and blocking rate. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104581>
- Svensk Elstandard. (2019). *SEK Handbok 426—Klassning av explosionsfarliga områden—Områden med explosiv gasatmosfär* (5:e uppl.).
- Svenska institutet för standarder. (2007). *Explosiv atmosfär—Tryckavlastning vid explosion* (SS-EN 14797 2006 EN).

Särdqvist, S. (2013). *Vatten och andra släckmedel*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Thomas. (u.å.). *How Gas Detectors Work*. Thomasnet. Hämtad 17 november 2021, från <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/How-Gas-Detectors-Work/>

Tsai, C. F., & Young, M. S. (2006). Measurement system using ultraviolet and multiband infrared technology for identifying fire behavior. *Review of Scientific Instruments*, 77(1), 014901. <https://doi.org/10.1063/1.2151847>

Uneram, C. (2015). *Skydd mot brand: Före, under och efter räddningsinsats* (4:e uppl.).

von Dalwigk, I., Söderbom, J., & Ghaem, S. (2021). *Vätgas för flexibelt och robust energisystem*. EIT InnoEnergy Scandinavia.

http://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering_/program-och-uppdrag/sectorsstrategier/vatgas-for-flexibelt-och-robust-energisystem.pdf

Vätgas Sverige. (2020). *EU-kommissionen satsar 430 miljarder euro på vätgas*. Vätgas Sverige. <https://www.vatgas.se/2020/07/08/eu-kommissionen-satsar-430-miljarder-euro-pa-vatgas/>

Wang, D., Zhao, F., & Wang, T. (2015). The ultrasonic characteristics study of weak gas leakage. *2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, 681–685. <https://doi.org/10.1109/FPM.2015.7337201>

Xiao, H., Wang, T., & Fan, W. (2012). Study on Leaking Detecting by Ultrasonic Testing System with Leak Hole Estimation. *Advances in Computing*, 235. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.235.204>

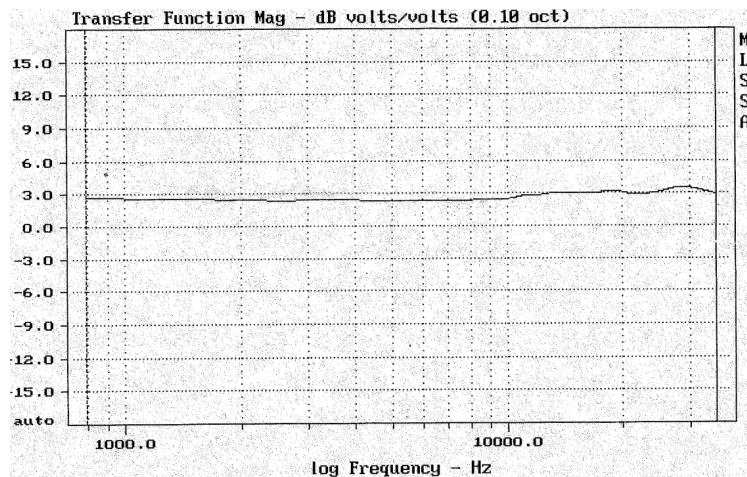
Xie, Y., Lv, N., Wang, X., Wu, D., & Wang, S. (2021). Thermal and fire characteristics of hydrogen jet flames in the tunnel at longitudinal ventilation strategies. *Fuel*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121659>

Xu, F., & Zhang, X. (2013). Test on Application of Flame Detector for Large Space Environment. *Procedia Engineering*, 52, 489–494. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.173>

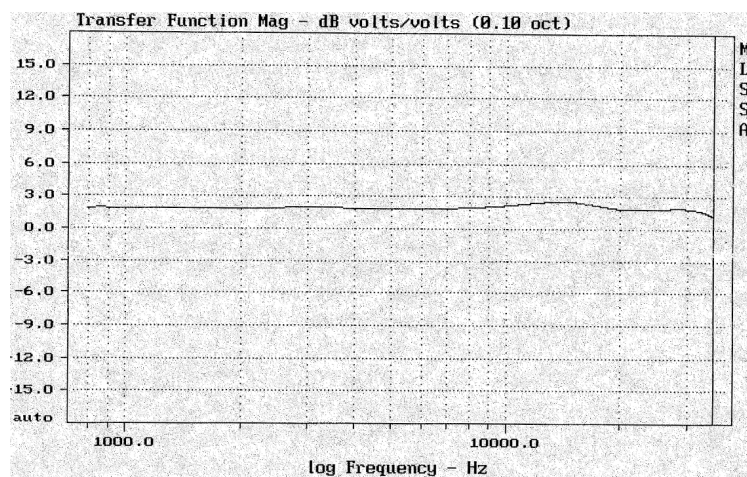
Yates, G. J., Wilke, M., King, N., & Lumpkin, A. (1988). *Ultraviolet Imaging Of Hydrogen Flames* (R. E. Huffman, Red.). <https://doi.org/10.1117/12.946900>

Bilaga - Laborationsmikrofoners kalibreringsspektrum

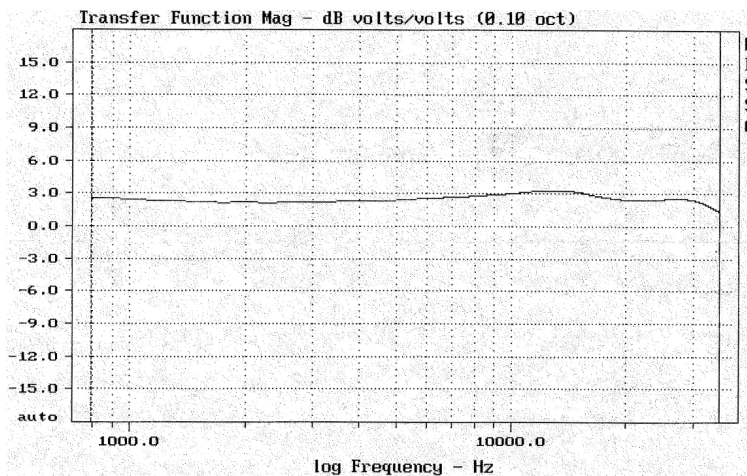
Mikrofonernas kalibreringsspektrum presenteras i figurerna nedan.



Figur 20 – Kalibreringsspektrum för mikrofonen rakt framför utsläppet (0°).



Figur 21 – Kalibreringsspektrum för mikrofonen snett framför utsläppet (45°).



Figur 22 – Kalibreringsspektrum för mikrofonen bredvid utsläppet (90°).