

Motorcellförberedelse för vätgasdrift

Matias Malm

Examensarbete för ingengörsexamen (YH)

Maskin- och produktionsteknik

Vasa 2021



EXAMENSARBETE

Författare: Matias Malm

Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa

Inriktningsalternativ: Drift- och energiteknik

Handledare: Kenneth Ehrström, Novia

Kaj Portin, Wärtsilä

Titel: Motorcellförberedelse för vätgasdrift

Datum 15.03.2021

Sidantal: 54

Bilagor: 6

Abstrakt

Vad krävs för att hantera vätgas i ett befintligt gassystem till en motorcell?

Examensarbetet behandlar vilka olika åtgärder som krävs för hantering av vätgas i ett gassystem som tidigare är konstruerad för naturgas. Detta arbete är gjort för Wärtsilä Finland Oy.

För att upprätthålla en bra miljö och reducera farliga utsläpp krävs flertals olika lösningar för att frånga från de fossila energikällorna. Då krävs bland annat nya bränslen åt förbränningsmotorer. Vätgas är ett bränsle som länge har funnits på marknaden som ett alternativt bränsle, men har dessvärre inte ännu tagit större marknadsposition.

Syftet med examensarbetet var att kartlägga vilka åtgärder som bör tas för att på ett säkert sätt och enligt lagstiftningen implementera vätgas i ett befintligt gassystem. Fokus läggs på planering för vätgasdrift, inte på faktiska modifieringar, eftersom praktiska omställningen inte är inom samma tidsram som examensarbetet. Delsyftet var att ta reda på hur omfattningen av bränslehanteringen påverkar verksamhetsutövaren.

Resultatet visar att förberedelse för vätgasdrift kräver mera åtaganden och åtgärder i jämförelse med naturgasdrift. Detta grundar sig i vätets egenskaper som bidrar till explosionsrisker, väteförspredning, läckage och brandrisker, myndigheternas krav och högre säkerhetsåtaganden. Bland annat kommer rörmaterialet bytas ut, tillstånd för lagringen ska beviljas, mer säkerhetsåtgärder krävs, förbättring av övervakningen och personalen ska utbildas. För att motortestningen i framtiden ska gå säkert till så behandlar det här examensarbetet en redogörelse över saker som ska ändras om och förberedas för vätgasdrift.

Språk: svenska

Nyckelord: vätgas, säkerhetsåtgärder, motorcell

BACHELOR'S THESIS

Author: Matias Malm

Degree Programme: Mechanical and production engineering

Specialization: Process and energy technology

Supervisor(s): Kenneth Ehrström, Novia University of Applied Science

Kaj Portin, Wärtsilä

Title: Engine cell setup for hydrogen as fuel

Date 15.3.2021 Number of pages: 54

Appendices: 6

Abstract

The purpose of the thesis is to map out what measures should be taken to safely and in accordance with legislation implement hydrogen in an existing gas system. The focus is on planning for hydrogen operation, not on actual reconstruction works, as the practical work is not within the same timeframe as the thesis. The sub-purpose is to find out how the extent of fuel management affects the operator.

To maintain the environment and reduce hazardous emissions, several different solutions are required to move away from fossil fuels. Then, among other things, new fuels are required for internal combustion engines. Hydrogen is a fuel that has long been on the market as an alternative fuel but has unfortunately not been winning any major marketshare yet.

What is required to handle hydrogen in an existing gas system for an engine cell? The thesis deals with the various measures required for handling of hydrogen in a gas system that has previously been designed for natural gas. This in collaboration with Wärtsilä Finland Oy.

The results show that preparation for hydrogen operation requires more commitments and measures in comparison with natural gas operation, it is based on the properties of hydrogen that contribute to explosion risks, hydrogen embrittlement, leakage and fire risks, government requirements and higher safety commitments. Among other things, the pipe material must be replaced, permission for storage must be applied for, more safety measures required, improvement of monitoring and personnel must be trained. For the engine testing to proceed safely in the future, this thesis deals with the things that need to be changed and prepared for hydrogen operation.

Language: Swedish

Key words: Hydrogen, safety, enginecell

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte.....	2
1.2	Mål.....	2
1.3	Avgränsning.....	2
1.4	Företagsbeskrivning	2
2	Teori	3
2.1	Väte	3
2.2	Lagring.....	5
2.2.1	Komprimerad vätgas.....	5
2.2.2	Flytande väte	5
2.3	Lagring och hantering av farliga kemikalier	7
2.3.1	Liten industriell hantering av farliga kemikalier	7
2.3.2	Omfattande hantering av farliga kemikalier	8
2.3.3	Dokumentation över verksamhetsprinciperna	9
2.3.4	Utarbetande av säkerhetsrapport.....	9
2.4	Väteförspredning	10
2.5	Användning av farliga kemikalier i byggnader	12
2.6	Rörsystem	15
2.6.1	DN klass.....	16
2.7	Säkerhetskrav	17
2.7.1	ATEX-direktiv.....	19
2.7.2	Arbetsgivarens skyldigheter	23
3	Metod	24
3.1	Litteratur	24
3.2	Lagar, förordningar och standarder	25
3.3	Analys.....	26
4	Tidigare studier.....	28
5	Modifiering av testcell för vätgasdrift.....	29
5.1	Tillstånd	31
5.2	Lagring och hantering.....	31
5.2.1	Bränslesystem.....	33
5.2.2	ATEX-direktiv.....	37
5.3	Säkerhetsåtgärder.....	40
5.3.1	Övervakning.....	40
5.3.2	Andra skyddsåtgärder	43

5.3.3	Räddningsplan	46
6	Diskussion	48
6.1	Problemområden	49
6.2	Vidare utveckling.....	50
7	Avslutning	51
8	Källförteckning.....	52

Ordlista/förkortningar

EU = Europeiska unionen

CO₂ = Koldioxid

H₂O = Vatten

LFL = Lägre explosionsgränsen

UFL = Övre explosionsgränsen

LHV = Lägre värmevärdet (Lower heating value)

HE = väteförsprödning (hydrogen embrittlement)

HIC = Vätebringat sprickbildning (hydrogen introduced cracking)

mJ = Milli joule

HRC = Hardness rockwell C

MPa = Mega pascal

GVU = Gastryckregleringsenhet

Tukes = Säkerhets-och kemikalieverket i Finland

1 Inledning

Dagens energiproduktion är ca 81% (International energy agency, 2018) fossila bränslen, vilket förorsakar en stor del av den globala utsläppen. Den betydande kvoten fossila bränslen i energiproduktionen är en stor sektor där användningen behöver reduceras för att uppnå reduktion i globala utsläpp. Lösningen kan vara förnybara energikällor. En annan orsak till reduktionen av fossila bränslen är tillgången på råvaran avtar och därför behövs alternativa förnybara bränslen.

Som en energibärare, råvara och bränsle kan väte underlätta integrationen av förnybara energikällor till energiproduktionen. Väte möjliggör energibalansering och energilagring och en väg från förbränning av fossila bränslen (HydrogenEurope, 2019). Väte har speciell potential att bli en energibärare för effektivisering och lagring av energi. (Satyapal, 2017). Förbränningseffektiviteten och utsläppsfria driften med vätet gör att den har förmåga att implementeras som bränsle i flera olika applikationer som både bränsleceller och förbränningsmotorer.

Största utmaningen är att få väteproduktionen från förnybara koldioxidfria källor kostnadseffektiv, i jämförelse med produktion från andra fossila bränslen vilket i dagens läge är mer kostnadseffektiva (Satyapal, 2017) . Den första strategiska uppgiften är att producera väte med förnybara källor för att konkurrera ut produktionen av väte med fossila bränslen. Till största delen produceras väte av gas och kol vilket resulterar i utsläpp mellan 70 och 100 miljoner ton CO₂ årligen i EU (Campi & Karagianni, 2020) . För tillfället är vätetets andel under 2 % av Europas energikonsumtion och tillverkas till största del av fossila bränslen. Utmaningen med att övergå till väte som bränsle är produktion, infrastrukturen, höga kostnader och den låga processeffektiviteten. (GATES, 2020)

Det här examensarbetet behandlar hur upprättning av ett vätgassystem utförs med avseende på lagstiftningen, standarder, säkerheten och befintliga gassystemet. Här sammanställs teorin kring lagstiftningen och standarder samt praktiska förslag på tillvägagångssättet för att upprätta ett säkert bränslesystem för vätgas, samt behandlar också hur omfattningen av lagringen och hanteringen påverkar verksamhetsutövaren. Kring bränslesystemet behandlas hanteringen, rörsystemet, säkerhetsåtgärderna och andra nödvändiga system för en fungerade och driftsäker anläggning.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet var att redogöra vilka saker som behöver åtgärdas för att implementera vätgas i ett bränslesystem för naturgas.

I arbetet sammanställs också hur implementering sker med tanke på omfattningen av väte, vilka förordningar som gäller och vad som krävs av verksamhetsutövaren.

1.2 Mål

Målet var att redogöra för en fungerande lösning på ett bränslesystem för vätgas, samt redogöra för en säker hanteringsanläggning för vätgas, med hjälp av Säkerhets- och kemikalieverkets vägledning.

1.3 Avgränsning

Examensarbetet behandlar inte förbränningstekniken med vätgas utan enbart hanteringen och upplagringen av vätgas till motorn. Eftersom tidtabellen för faktiska uppdateringen av bränslesystemet inte sker inom tidsramen för det här arbetet, så begränsas arbetet till den teoretiska delen.

1.4 Företagsbeskrivning

Wärtsilä Oyj är ett finländskt aktiebolag som är marknadsledande inom marin och energisektorn. Omsättningen för år 2020 låg på 4604 miljoner €, företaget är verksam i över 70 länder och över 17 000 anställda. Investeringen till forskning och utveckling låg på ca 3% av omsättningen samma år, mer exakt 153 miljoner.

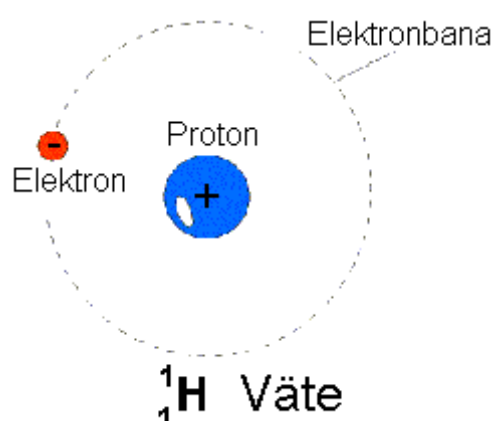
Forskning och utvecklingsenheten har sammanlagt fyra motortestlaboratorier, två i Finland, ett i Spanien och ett i Italien. De två som är i Finland är belägen i Vasa, ett vid motorfabriken och det andra i Vasklot. (Wärtsilä, 2021)

2 Teori

Detta kapitel behandlar teorin för examensarbetet. Teorin till examensarbetet fungerar som grund för besluten när det gäller upplagringen av vätgas och design av gassystemet. Förordningarna och standarderna är en viktig referensram för hur omfattningen kring hanteringen av vätgas upprättas i praktiken. Samtidigt behövs också teorin kring vätgas för att få förståelse för bränslets egenskaper och vilka krav det avser, speciellt med vikt på säkerhetsåtgärderna.

2.1 Väte

Väte är ett grundämne med egenskaper som urskiljer sig från andra grundämnen. Väteatomen betecknas med H och är den minsta och lättaste atomen av alla grundämnen. Det normala tillståndet hos väteatomen är i en tvåatomig molekyl med kemiska beteckningen H_2 i gasform. Väte förekommer främst i föreningar som t.ex. vatten (H_2O). I figur 1 syns väteatomen enligt Bohr modellprincipen. Den består av en positivt laddad kärna och en elektron, vilket gör att den reagerar lätt med andra ämnen, av den orsaken förekommer den enbart med andra föreningar i naturen. Det är därför väte har potential att bli en energibärare, vilket betyder att den kan lagras skilt i andra föreningar från den primära energikällan och överföra energi enligt behov. (Pant & Gupta, 2009)

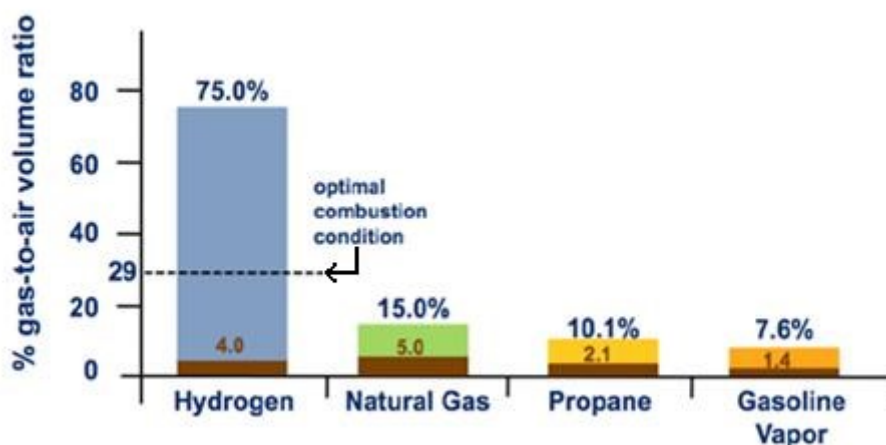


Figur 1. Väteatomen enligt Bohr-modellen. (Atomfysik, 2021)

Väte är helt luktfritt, färgfritt och smaklöst, har en vikt som är en fjortondedel av vikten för luft vid normaltryck och sprider sig snabbare än någon annan gas. Värmevärdet för väte är

119 MJ/kg vilket är ca tre gånger högre än för andra konventionella flytande bränslen så som bensin och diesel. (Pant & Gupta, 2009)

Explosionsgränserna för vätgas är ca sex gånger större än jämförelsevis komprimerad naturgas (CNG). Lägre explosivitetvärdet LFL för väte är 4%, vilket betyder att det krävs endast 4 % av luften i ett utrymme som består av väte för att kunna antändas av en gnista. Det kan jämföras med naturgas som har 5 % gräns, avviker inte i hög grad från väte. Övre explosivitetvärdet UFL är 75% för väte, vilket betyder att om luft- och bränsleblandningen i utrymmet har mera än 75% sker ingen antändning. Kan jämföras med naturgas som har 15 %. Det är här risken kommer med större volymväte, vilket också krävs p.g.a. dess låga volym och massdensitet (Pant & Gupta, 2009). Figur 3 ger en visuell jämförelse på explosionsgränserna mot andra bränslen så som naturgas.



Figur 2. Vätets (blå stapel) explosionsgränser jämfört med naturgas(grön), propan (ljusgul) och bensinånga (orange), bruna stapeln representerar LFL. (Energy, u.d.)

Det som också gör väte mer riskfyllt utöver explosionsgränserna är den låga antändningsenergin som ligger på 0,017 mJ. Detta kan jämföras med andra kolväten som har kring 0,25 mJ. I kombination med den låga antändningsenergin, explosionsintervallet och svårigheten att se bränder gör att seriösa säkerhetsåtgärder krävs för en säker drift. (AISBL, 2014)

Den låga antändningsenergin möjliggör att statisk elektricitet är en potentiell antändningskälla, t.ex. kamning av hår kan bilda statisk elektricitet och bildar mycket hög spänningsnivå. Detta innebär är att alla möjliga antändningskällor behöver ses över där läckage kan uppstå, alltså i riskzoner. (Rigas & Sklavounos, 2009)

Det som är attraktivt hos väte som bränsle är att ur förbränningssynvinkel blir den teoretiska slutprodukten blir enbart vatten (H_2O).

2.2 Lagring

Det problem som väteets volymdensiteten medför är lagringen och hanteringen blir utmanande. För att lagra ett kilogram vätegas behövs ca 11 m^3 . (Cao & Krishnamurthy, 2009) Det finns två etablerade möjligheter för transport och lagring vilket är att lagra under höga tryck eller att kyla ner till kokpunkten $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ för att få det flytande vätska. Utöver dessa finns andra metoder vilka är mindre använda för lagring av väte, det tas inte upp i kapitlet.

2.2.1 Komprimerad vätegas

Vanligare metoden är att lagra under högt tryck med tryckkärl i stål (200 bar) eller med kompositflaskor som möjliggör upp till 800 bar. Detta möjliggör att volymdensiteten förhöjs och mera energi kan lagras i mindre volym. Vid trycksättning upp till 800 bar kan vätegasen nå en volymdensitet på $36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. (Zuttel, 2004)

Volymetriska energidensiteten för vätegas är endast 36 % av den volymetriska energidensiteten för naturgas under samma tryck. Utmaningen blir då att mera volym krävs för att nå upp i samma energiflöde, det i sin tur ökar på pumpeffekten. Pumpeffekten i sin tur bestäms av viskositeten, rörets längd och flödes hastighet. (Speight, 2007)

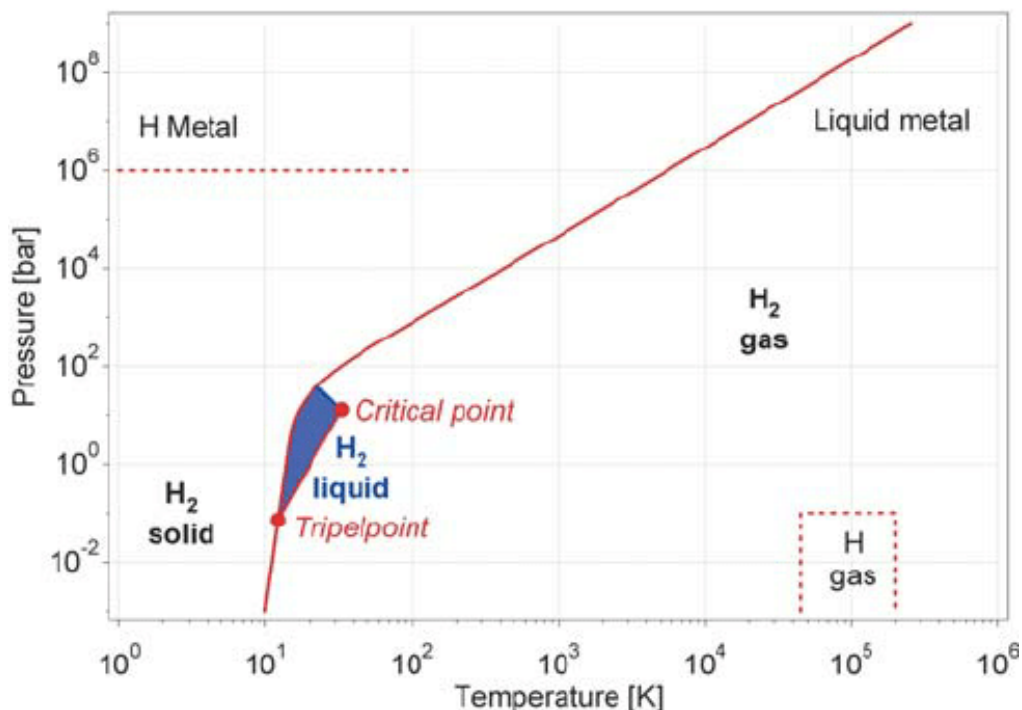
Det betyder att det är mer kostsamt att transportera bränslet i rörsystem jämfört med naturgas, då den totala energiförlusten för transporten är ca 4 % av energiinnehållet. (Speight, 2007)

För kompression av väte finns olika typer av kompressorer och kompressorns karaktär sätter gräns på vilken trycknivå som kan åstadkommas. Vissa kompressorer som t.ex. kolvkompressorn kan komprimera till högt tryck men lägre volym än i jämförelse med skruvkompressorn som kan komprimera stora volymer men till ett lägre tryck. (Cao & Krishnamurthy, 2009). Kompression av väte konsumerar också en del energi av energiinnehållet, jämfört med flytande väte så är energikonsumtionen lägre.

2.2.2 Flytande väte

Orsaken varför lagring i flytande form sker är att volym – och massdensiteten är högre än trycksatt vätegas till 800 bar, som vätska har väte en volymdensitet på $70,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. För att

hålla vätet flytande kräver det att man håller temperaturen under kokpunkten vilket är -253 °C. Figur 2 beskriver vätets olika faser mellan gas, vätska och fast. Från trippelpunkten till kritiska punkten är avståndet endast 6 °C i temperaturskalan, det innebär en begränsad ram för att hålla vätskan i vätskefas.



Figur 3. Väte fasdiagram. (Zuttel, 2004)

Utmaningen är att hålla temperaturen vid -253 °C (20K) utan att förbruka onödigt mycket energi i processen. Nerkylnings och förgasningsprocessen kräver en energimängd motsvarande ca 30% energimängd av bränslet LHV-värde. (Cao & Krishnamurthy, 2009)

2.3 Lagring och hantering av farliga kemikalier

För upplagring och hantering av farliga kemikalier finns ett antal krav och skyldigheter som gäller för att upprätta en verksamhet. Vätgas som bränsle har flertal egenskaper som innefattar större risker än t.ex. flytande bränslen. För att säkerställa att inga olyckor sker och att olyckornas konsekvenser är så lindriga som möjligt, behöver lagringsplatsen byggas i enlighet med lagar och förordningar, med hänseende till de andra bränslen som lagras på samma plats.

Enligt lagen om *Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor* (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005) är syftet att förebygga och avvärja skador på personer, miljö och egendom (§1). Beroende på omfattningen av den planerade mängden som ska lagras finns olika tillståndskrav, mer om detta i tabell 1 nedanför.

Tabell 1. Lagringsmängden till tillståndskravet för väte, från Statsrådets förordning om övervakning av hanteringen och upplagringen av farliga kemikalier 2015/685 bilaga I, del 1. (Statsrådets förordning om övervakning och upplagring av farliga kemikalier 21.5.2015/685, 2015)

Lagringsmängd för väte	Tillståndskrav
> 100 kg	Anmälan till lokala räddningsmyndigheten, liten industriell hantering av farliga kemikalier
> 2000 kg	Tillstånd för hantering och lagring av Tukes
> 5000 kg	Dokument om verksamhetsprinciperna
> 50 000 kg	Säkerhetsrapport

2.3.1 Liten industriell hantering av farliga kemikalier

En mindre omfattande industriell hantering får utövas endast om en anmälan görs enligt §24 i *Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor*. (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005). Anmälan görs till räddningsmyndigheten, det gäller mängder under 100 kg för vätgas. I ansökan skall ingå uppgifter om verksamhetsplanen samt säkerhetsarrangemanget. Tillsyn av anläggningar som hanterar en liten industriell hantering och upplagring bevakas av räddningsmyndigheten samt bevakningen av tekniska genomförandet enligt §27a i (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005).

Inspektionen för anläggningen utförs också av räddningsmyndigheten som ska planmässigt och systematiskt inspektera med bestämda intervaller. Inspektionerna ska tas in i tillsynsplan som avses i §79 i räddningslagen (Räddningslag 29.4.2011/379, 2011). En intern räddningsplan behövs ej upprättas vid liten industriell hantering av farliga kemikalier.

2.3.2 Omfattande hantering av farliga kemikalier

Definitionen för omfattande hantering och upplagring av farliga och explosiva kemikalier kan beskrivas på följande vis, då upplagrad volym överskrider 100 kg väte och då mängden av flera olika farliga kemikalier på industriområdet överskrider ett relationstal, gränsvärdet för tillståndskrav är 1. Mer information kring hantering och upplagringen fås från (Statsrådets förordning om övervakning och upplagring av farliga kemikalier 21.5.2015/685, 2015). Relationstalet kan beskrivas enligt följande:

$$s = \frac{q_1}{Q_1} + \frac{q_2}{Q_2} + \frac{q_n}{Q_n} \quad (1)$$

q avser den mängd som hanteras eller lagras vid anläggningen, Q står för den maximimängd som är tillåtet att hantera vid liten industriell hantering av farliga kemikalier. Mängderna hittas i *Statsrådets förordning om övervakning av hanteringen och upplagringen av farliga kemikalier 685/2015*, kolumn 2 i del 1 samt 2 i bilaga I.

Placeringen av lagringsplatsen behöver göras med hänsyn på möjliga konsekvenser av en olycka, *Statsrådets förordning om övervakning av hanteringen och upplagringen av farliga kemikalier (685/2015)* behandlar vilka åtgärder som krävs för placering, hantering och upplagring.

En omfattande industriell hantering får endast utövas med Säkerhets- och kemikalieverkets tillstånd, ansökan för tillståndet skall göras till Säkerhets- och kemikalieverket, Tukes (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005) §23.

För tillståndet krävs också en miljökonsekvensbedömning om projektet innefattar det som krävs för en miljökonsekvensbedömning.

Säkerhets- och kemikalieverket Tukes inspekterar omfattande industriell hantering och upplagring. De skall också övervaka det tekniska genomförandet av anläggningen enligt §26a i *Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor*. (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005) Anläggningen skall före användning inspekteras av Tukes och regelbundet enligt ett upprättat tillsynsprogram för

anläggningen enligt §27 (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005). Dit ingår också besiktning av rörsystemet av ett besiktningsorgan, före systemet kan tas i bruk.

Tillsynsprogrammet är gjord av Säkerhets- och kemikalieverkets för endast omfattande industriell hantering och upplagring.

Verksamhetsutövaren skall upprätta en intern räddningsplan enligt §28 i (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005). Räddningsplanen innefattar de åtgärder som avvärjer olyckor och kartlägger vilka olycksrisker som finns samt planlägga hur undanröjningen av olyckor och miljön rengörs.

Samtidigt om hanteringen och upplagringen är omfattande bör verksamhetsutövaren utse en ansvarig person för verksamheten av anläggningen enligt §29 i (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005). Den ansvariga personen skall känna till anläggningen och de bestämmelser som gäller för en säker verksamhet. Det gäller också rörsystemet. Ansvariga personen bör avlägga ett kompetensprov som anordnas av Säkerhets- och kemikalieverket.

2.3.3 Dokumentation över verksamhetsprinciperna

Då lagringsmängden uppnår 5000 kg väte så krävs ytterligare dokument av verksamhetsprinciperna. Det gäller också då summan av relationstalen för alla kemikalier som lagras vid anläggningen är lika med eller över 1, enligt ekvation 1. (Statsrådets förordning om övervakning och upplagring av farliga kemikalier 21.5.2015/685, 2015)

2.3.4 Utarbetande av säkerhetsrapport

Om lagringsmängden når 50 000 kg av väte så krävs dessutom en säkerhetsrapport av verksamhetsutövaren. Det gäller också om summan av relationstalen för alla kemikalier som lagras eller hanteras vid anläggningen är lika med eller över 1 enligt ekvation 1. (Statsrådets förordning om övervakning och upplagring av farliga kemikalier 21.5.2015/685, 2015)

2.4 Väteförsprödning

När väte kommer i kontakt med metaller kan metallen reagera på olika sätt, framför allt s.k. väteförsprödning. Detta beror på att metallerna absorberar vätet så att strukturen i materialet förändras. Då strukturen förändras, ändras också materialets hållfasthet. Det i sin tur kan leda till oönskade sprickbildningar eller bristningar. Materialets egenskaper reagerar olika till väteförsprödning, höghållfasta material är mer känslig för väteförsprödning än låghållfasta material. (Cao & Krishnamurthy, 2009)

Vätets penetrering och diffusion genom stålet är processen för väteförsprödning (HE). Allmänt har väte nästan alltid en skadlig effekt på materialets mekaniska egenskaper, senare undersökningar har gjorts på stål med lågt vätgastryck men lite med högt tryck. Olje-och gasindustrin har bättre erfarenhet med (HIC&HE) i rörsystemen.

Vid transport av större volymer väte så är risken större för HIC och HE i rörsystemet. Det som ska beaktas ifall rörsystem svetsas är att risken för HIC och HE är större vid svetsregionerna. (Cao & Krishnamurthy, 2009) Stål som används i rörsystem för vätgas bör ha en maximum hårdhet på 22 HRC, den ekvivalenta brottgränsen är 800 MPa, svetsen bör heller inte överskrida dessa värden. Det ska noteras att svetsregionen skapar oftast högre hårdhet, och blir då mera benägen för väteförsprödning. (AISBL, 2014)

Det viktigaste från de tidigare undersökningarna från 1970-talet på låghållfasta material är hur mycket förhöjt gastryck inverkar på spänningsintensitetsfaktorn K_{IH} . Spänningsintensitetsfaktorn K_{IH} är lägre för höghållfasta stål, vilket betyder att högt vätgastryck påverkar K_{IH} lite eller mycket lite av eventuella tryckökningar. Det innebär att redan med låg vätgastryck är höghållfasta material mer benägen för väteförsprödning än låghållfasta stål. (Cao & Krishnamurthy, 2009)

Alternativa lösningar för att begränsa väteförsprödningen är:

- Lägre hållfasthet stål, högt kvalitetsstål, med små kvalitetsavvikelser.
- En filmbeläggning på insidan av röret.
- Tjockväggiga rör för att tillåta en mild HE.
- Al-Fe stål, där aluminium-delen skapar en vätebarriär.
- Låg Mn, mycket låg S och relativt låg C halt material.

Redan från tillverkning bör kvalitetsfelen på rörmaterialet minimeras och bra tillverkningskvalitet eftersträvas. Toleransen för vad rörledningarna kan upprätthålla utan skador är en funktion av mekanisk belastning, material och vätgastryck. Därför eftersträvas alltid noggrannhet på materialvalet så att säkerheten kan upprätthållas.

2.5 Användning av farliga kemikalier i byggnader

Byggnader för lagring av farliga och explosiva kemikalier skall dimensioneras så att följden av en explosion eller brand är så liten som möjligt. Mera information kring brandsäkerhet för byggnader hittas från Finlands byggbestämmelselag E1 och E2 (Kemikaalivirasto, 2015).

Används väte inomhus finns potential för att få en sådan luft och bränsleblandning som krävs för explosion. Explosionsrisken är det största orosmomentet med vätgas och konsekvenserna efter en olycka kan vara ödesdigra, därför är det viktigt att lägga vikt på att inte skapa den farliga luft-bränsleblandningen och eliminera alla potentiella tändkällor som kan antända luft-bränsleblandningen.

För att minimera explosionsrisken hjälper det att ha stor volym i byggnaden där vätgasen används så att det tillåter en större mängd vätgas innan det når lägre explosion värdet, LFL-värdet. Väte har tendensen att enbart brinna mellan 4 % och 8 % LFL värde och explosionsrisken kommer först vid 15 % LFL värde. Med hjälp av extern ventilation som koncentreras till potentiella läckagekällor så ökas ytterligare säkerheten, där behövs också mätinstrument för att identifiera väteinnehållet ifall läckage uppstår. (Olav Hansen, 2020)

Detta betyder att ventilationen är en viktig säkerhetskomponent vid upplagring och hantering av farliga och explosiva kemikalier i industrin och i byggnader. Ventilation bör vara tillräcklig både vid hanteringen och upplagringen så att inga farliga blandningar uppstår under en längre tid. Organiseringen av ventilationen bör göras så att den är tillräckligt kraftig att inte bränsle och luftblandningen överskrider 25 % av bränslets LFL värde. (SFS, 2012)

Ventilationen eller luftombytet kan ske på fler än ett ställe. Då ifall ventilationen sker på fler ställen rekommenderas att ventilationsrören dras skilt från platserna och inte sammankopplas ihop till ett rör. Ifall flertals rör sammankopplas behöver nödvändiga dimensioner utformas för att hantera flödet, så att det inte bygger upp tryck i systemet. Ventilationsrörets längd över taket bör vara tillräckligt och möjliga risker med rörets längd bör kartläggas. (NASA, 1997)

Intervju gjordes med sakkunniga konsulter inom området, där ställdes frågor om olika arrangemang gällande väte. Ventilationen behöver koncentreras till takhöjder, ifall vätgas läcker stiger den alltid uppåt när vätgasens densitet är lättare än luft. Ventilationen behöver endast koncentreras till ställen där det finns potential för läckage. Helst skall rörlängden vara kortaste möjligt för extra skyddsåtgärd, och utgången bör placeras högt upp. Ventilationen bör vara separat från byggnadens egna. Ventilationssystemets material bör skyddsjordas och

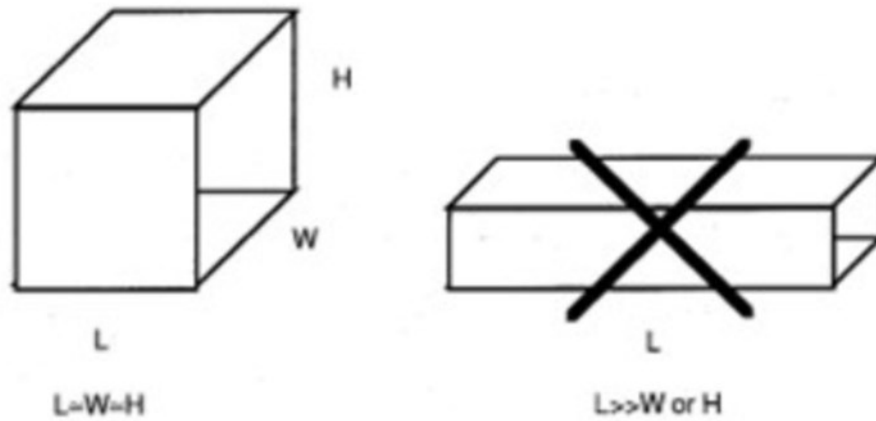
förses med anti-statiska material ska användas, detta gäller slangar, rör och andra material som kan komma i kontakt med den ventilerade luften.

(Olav Hansen, 2020)

De viktigaste åtgärderna vid användning av vätgas i byggnad eller inomhus:

- Då väte har låg antändningsenergi och lättare än luft, ska explosionsskyddsåtgärder uppmärksammas ordentligt.
- Riskanalys, kartlägga riskerna som kan uppkomma med vätgasanvändning i byggnaden.
- Utrymmets luftomväxling, riskområdets zon-klassificering vid explosiva omgivningar och ATEX-direktiv för utrustning ska kartläggas noggrann.
- Se till att vätgasen inte sprider sig till andra delar av byggnaden, som t.ex. genom undertryck i motorcellen med hjälp av ventilation och koncentrera extern ventilation till potentiella läckageställen.
- Ha en interaktiv övervakning av läckage och bränder, med hjälp av t.ex. vätesensorer och brandalarm.
- Förbered räddningsplan informera alla som är berörda, utbilda personal kring riskerna.
- Tryckreducerande anordning, som t.ex. en lättare vägg som konstrueras lättare än andra väggar i byggnaden.

Användningen av vätgas inomhus har den fördelen att om läckage uppstår så samlas det högt upp vid undertaket. Nackdelarna är att vätetets diffusion sker mycket snabbt, den låga antändningsenergin och ett lägre LFL-värde (än naturgas). I figur 4 syns en illustration av hur byggnaden ska fördelaktigt vara för användning av vätgas inomhus.



Figur 4. Det är fördelaktigt att byggnaden har högt till tak snarare än lågt. (Bjerketvedt; Bakke; & Wingerden, 1997)

Vätgasanvändningen inomhus kräver en del omtanke med tanke på säkerhetsriskerna. För att försäkra att inga läckage sker och ha möjlighet att kontrollera vätgastillförseln behövs ett rörsystem. Nästa kapitel behandlar teorin för rörsystemet.

2.6 Rörssystem

Det finns alltid olika material och komponenter som utformar ett rörssystem för att hantera bränslen. Ifråga om vätgas krävs då ytterligare materialval för att undvika väteförspredning och HIC. Andra material som noggrant ska väljas, är tätningar som kan förekomma i skarv eller på andra ställen. Då skall också materialvalet basera sig på bränslets fas, temperatur och tryck. För att ha en säker drift behövs rör som är lämpade för speciellt vätgas, det här kapitlet beskriver hur ett rörssystem behöver utformas med materialval och dimensioner för hantering av trycksatt väte.

Utformningen av ett säkert system kräver information av bland annat:

- Nationella lagar och förordningar för rörssystem för gas och speciellt för väte.
- Lokala omgivningen.
- Standarder för rörssystem.
- Val av material.
- Vätets egenskaper.

Då väte kommer i kontakt med metaller och beroende på metallens egenskap påverkas det olika, de förändringar som förekommer med speciellt väte är väteförspredning, mer information om väteförspredning i kapitel 2.4.3. Speciellt hårdare material är mer benägen för väteförspredning, ett bra material vid kritiska områden är sega material och relativt okänslig för svetsning.

Det finns många faktorer som inverkar på väteförspredningens effekt så som tryck, renhet och temperatur. Generellt finns det tendens för förspredning vid högre tryck. Vanligt använda stål är austenitiska rostfria stål som EN 1.4404 (316L) och EN 1.4307 (304L) användas. (AISBL, 2014)

Rörssystemet faller inom kategorin tryckbärande anordningar. Lagen om tryckbärande anordningar (1144/2016) finns bestämmelser kring hur rörssystem ska konstrueras så att det inte äventyrar omgivningens säkerhet.

Vid intervjun med en sakkunnig inom området, frågades vilka rörmaterial som vanligen används med väte. Rörmaterial som vanligen används är lågkolstål austenitiska stål, eftersom då vätet kommer i kontakt med kolet reagerar det och resultatet blir då HIC och

väteförspredning. Det framkom att rekommenderade materialtypen är 316L, både flytande och gas. För att ytterligare undvika läckage, löns det att svetsa skarv och anslutningar. Potentiella läckagekällor är vid skarv av rör och andra komponenter. Materialvalet är därför viktigt för rör och komponenter så potentiella läckage kan koncentreras till vissa platser och hanteras med ventilation och mätutrustning. (Olav Hansen, 2020)

Materialvalet för olika komponenter i rörsystemet bör noggrant utväljas med tanke på de speciella omständigheterna med väte, som väteförspredningen och HIC. I bilaga 1 finns en tabell för rör- och tätningsmaterial.

Ifall bränslesystemet också hanterar bränslen som bio-och naturgas skall också ett bygglov inlämnas till samma myndighet som för tillståndet kring hanteringen och lagringen, alltså till Säkerhet och kemikalieverket (Tukes). Tukes beviljar antingen att byggstillstånd eller ett regionalt byggnadstillstånd. Tillståndsförfarandet varierar beroende på mängden lagrad bio-och naturgas, bränsleeffekt och driftryck. Ett bränslesystem för endast väte krävs inget specifikt byggnadstillstånd. (Tukes, Ansökan om byggnadstillstånd, 2021)

2.6.1 DN-klass

DN står för ”Nominal diameter”, och specificerar till en nominell rördiameter av ISO 6708. Klassen sträcker sig från DN10 till DN4000. Nominell betyder att den inte är specifik och talet representerar i närheten av rörets diameter i millimeter, kan avvika rejält. Det finns också klasser som specifikt hänvisar till ytter- och innerdiametern i form av DN/ID (inside diameter) och DN/OD (outside diameter). (Nominal pipe size, 2021)

Tabell 2. Tabell över DN-klass och exempel på verklig diameter för ett visst material

DN [Dimensionslöst]	Verklig [mm]
10	17.2
40	48.3
65	76.1
100	144.3

Det finns också en liknande klass för tryck, vilket betecknas med PN. Det beskriver nominella trycket vilket röret kan bibehålla. Till exempel PN16 är designad för 16 bar.

2.7 Säkerhetskrav

Industrin har redan under ett sekel använt och producerat väte med noggranna säkerhetsåtgärder, som bland annat i olje- och rymdindustrin. Fastän industrin har klarat sig relativt bra från allvarliga konsekvenser så finns det fortfarande vissa problem som kommer tydligare fram vid storskalig användning av väte som i t.ex. kommersiella applikationer. En av de största utmaningarna är acceptansen av väte som bränsle, speciellt för kommersiella användningar och applikationer. Industrierna har erfarenheter kring hanteringen av väte med höga säkerhetsföreskrifter, då endast utbildad personal hanterar väte. Detta syns också i antalet olyckor genom åren. Oberoende har två större olyckor förorsakat skepticism mot väteanvändningen, vilket är Hindenburg olyckan år 1937 och olyckan i Pasadena, Houston USA år 1989. (Rigas & Sklavounos, 2009)

Hindenburg var ett tyskt luftskepp som drevs med vätgas och har blivit ihågkommen då den fattade eld utanför New York, USA. Orsaken till Hindenburg olyckan var antändning av vätgasen som användes som lyftkraft för luftskeppet, det slutade med en explosion som tog 36 människoliv. Olyckan i Pasadena, Houston och orsaken till olyckan var gasutsläpp på grund av en reparation vilket tog 22 människoliv och över 100 skadades. (Rigas & Sklavounos, 2009)

Då vätgas släpps ut kommer den att spridas till omgivande miljön med både diffusions och flytande krafter. Väte är mer diffusivt än bensen, metan och propan och därför sprids den snabbare. Vid gasformigt väteläckage påverkar flytkraften (alltså densiteten) gasrörelsen mer signifikant än diffusionen. För läckage med hög fart, vilket är mer sannolikt i högtryckssystem, är flytkraften mindre betydande och frigöringsriktningen bestämmer gasrörelsen. (Venetsanos, 2008)

Vätets snabba diffusion är en av dess bästa säkerhetsegenskaper vilket kan vara en fördel, till exempel då diffusionen är så effektiv så den underlättar formationen av en homogen bränsle- och luftblandning. Fördelen kan också orsaka problem i form av okontrollerbar spridning vid läckage, väteläckage är riskfyllt då det skapar en bränsle- och luftblandning. Med tanke på vätets molekyl, storlek och viskositet ökar risken för läckage. Vätets diffusion är flera gånger snabbare än andra gaser, det betyder att om vätet introduceras i en öppen miljö kommer den att stiga och spridas snabbt. (Energy, u.d.)

Faror som kan anknytas till användning av väte är:

- Kemiska, brand och explosion.
- Fysiologiska, Köldskada (om flytande) och kvävning (om i gasform).
- Fysiska, väteförspredning och komponenthaveri.

Den största faran är att omedvetet bilda en explosiv atmosfär och orsaka explosion. Detta leder till att fokus borde läggas på kunskapen om möjliga faror vid olika arbetsprocesser från lagring till användningen av väte. (Rigas & Sklavounos, 2009)

Om en person är i närheten av väteläckage, brand eller explosion kan hen drabbas av flera olika skador. Detta har att göra med att väte är luktfritt, färglöst och syns inte då det brinner. Kvävning kan ske om ett utrymme har högt väteinnehåll, vid explosion kan lungorna punkteras från övertrycket som bildas, brandskador kan uppstå från strålningen av flamman och ifall flytande väte används kan köldskador uppkomma.

Olycksstatistiken från USA mellan åren 1968–1977 ger en bra bild över hur olyckor har skett. Av det statistikförda uppgifterna består 53 % av uppgifterna som oupptäckta läckage 22%, väte och syre avgasningsexplosioner 17% och rör och tryck bristningar 14%. (Rigas & Sklavounos, 2009)

Läckagen kan övervakas med mätinstrument, som t.ex. med hjälp av sensorer. Användning av instrument som reagerar på väte är kritiska för att kontrollera olyckor. Eftersom vätgasen är oundviklig till människan, märks det först t.ex. läckage när olyckor sker. En noggrann överblick av hur sensorerna bör placeras och vilken mätteknik som används ska göras för att säkerställa att de minsta läckage också upptäcks. Sensorerna bör monteras där den externa ventilationen är belägen samt högt upp nära taket ovanför den potentiella läckagekällan. (Olav Hansen, 2020)

Säkerheten kring lagringsplatsen för personal behöver beaktas med tydligt definierade avgränsningar. Då personal rör sig nära lagringsplatsen eller hanteringssystemet skall ATEX-förordningar följas, skyddsglasögon och hjälm behövs också. (Olav Hansen, 2020). Dessa säkerhetsåtgärder behöver också tillämpas vid mindre omfattande lagring av väte.

2.7.1 ATEX-direktiv

ATEX kommer från det franska ordet ”atmospheres explosibles” är ett säkerhetsdirektiv för tillverkare och konsumenter som beskriver vilka säkerhetskrav och regler som el komponenter uppfyller. Målsättningen med ATEX direktiven är att ha produkter som inte orsakar antändning i den omgivningen den är konstruerad för. Tillämpningsområdet för ATEX-direktivet är mekaniska och elektriska utrustningar, säkerhetssystem och komponenter i utrustningar. Okulär besiktning av utrustningen behöver göras vart 5, 10 och 15 år beroende på utrustningens klassificering, besiktning görs av en sakkunnig. (Kemikaalivirasto, 2015)

Arbetsgivaren har skyldighet att bedöma explosionsrisker. Vid bedömningen ska följande uppmärksammas

- I hurdana funktionsförhållanden finns det risk för explosion, som t.ex. underhållsarbeten, läckage i anslutningar eller tätningar, och att tätningar kan brista.
- Idrifttagning, driftavbrott och upp- och nerkörning.
- Funktionshinder eller störningar som t.ex. att ventilationen slutar fungera.
- Rimlig felanvändning.

Utöver det ska arbetsgivaren bedöma plats och varaktighet för explosionsriskerna. Resultatet från bedömningen bildar sedan en riskzons-klassificering. (Tukes, Explosionsfarliga omgivningar)

Det är explosionsfarlig atmosfär som skapar de säkerhetskrav och regler som ATEX-direktiven hänvisar till. En explosionsfarlig atmosfär kan orsakas av brännbar gas, ånga som blandas med luft i normaltryck. Det framgår också en klassificering av explosionsfarliga områden i olika zoner beroende på hur ofta en explosionsfarlig atmosfär uppstår. Klassificeringen delas in i zoner:

- Zon 0, där explosionsfarlig atmosfär uppstår kontinuerligt.
- Zon 1, där explosionsfarlig atmosfär uppstår ibland under normala tillstånd.
- Zon2, explosionsfarlig atmosfär förväntas inte uppstå under normal tillstånd men, när det gör mycket kortvarigt. (SFS, 2012)

Utifrån zonerna kan utrustningens kategori bestämmas. Klassificering för olika grupper och utrustning skall användas i enlighet med klassificeringen för explosionsfarliga omgivningar.

Klassificeringen för utrustning är i huvudsak till två olika användningsområden:

- Gruvor, dit produkter med klass I hör.
- Andra användningsområden förutom gruvor, dit grupp II hör.

Utöver gruppklassificeringen delas också grupperna i olika utrustningskategorier. Till grupp II ingår tre olika utrustningskategorier 1, 2, 3. Dessa kategorier representerar användningsområdet och främst sannolikheten för explosionsfarliga omgivningar. Detta betyder att, om det förekommer explosionsfarlig atmosfär kontinuerligt krävs en högre säkerhetsklass och då bör utrustningskategori 1 användas. (Tukes, Utrustning i explosionsfarliga omgivningar - ATEX, 2021)

Val av utrustningskategori kan refereras till den explosionsfarliga zonen, presenteras i tabellen nedan.

Tabell 3. Utrustningskategori hänvisat till zon för explosiv atmosfär. G står för gas (SFS, 2012)

Zon	Utrustningskategori
0	1G
1	1G och 2G
2	1G,2G och 3G

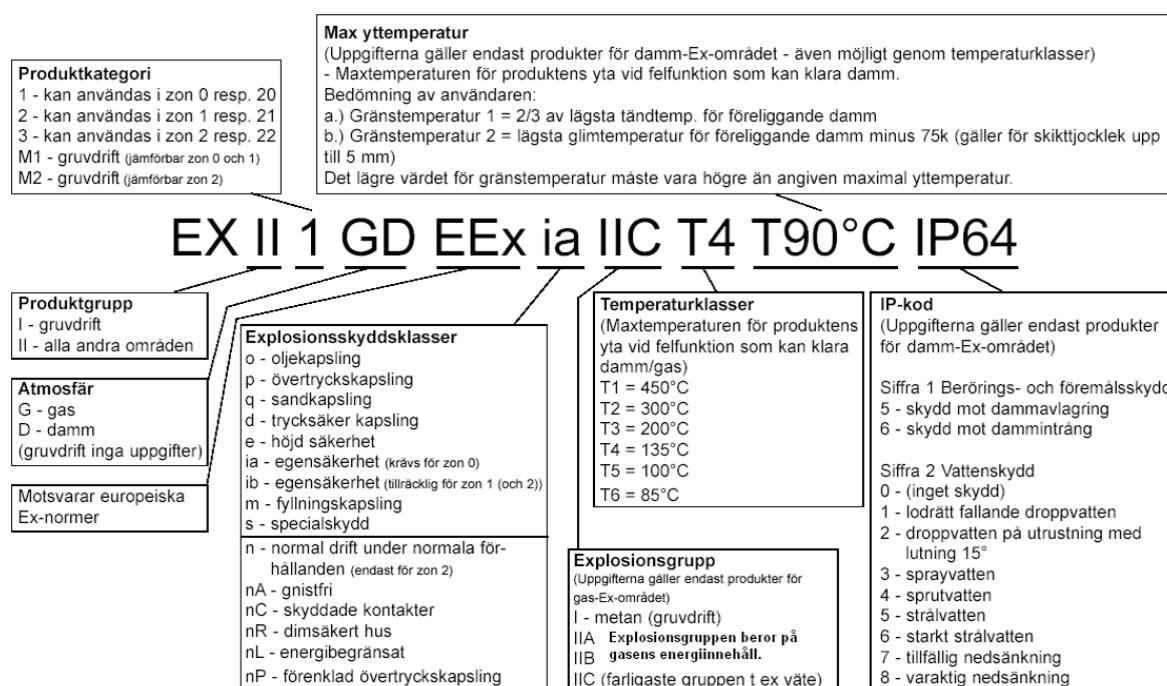
Det brännbara ämnet som reagerar med luften och bildar en explosionsfarlig atmosfär har också klassificeringskrav. För vätgas krävs utrustningsklassen IIC och det kan refereras till vätgasens egenskaper t.ex. den snabba diffusionen, låg antändningsenergi etc.

Tabell 4. Explosionsgruppens direktiv för olika kemikalier.

Explosionsgrupp	Godkänd explosionsgrupp
IIA	II, IIA, IIB, IIC
IIB	II, IIB, IIC
IIC	II, IIC
Referens: IEC EN 60079-14 Tabell 3	

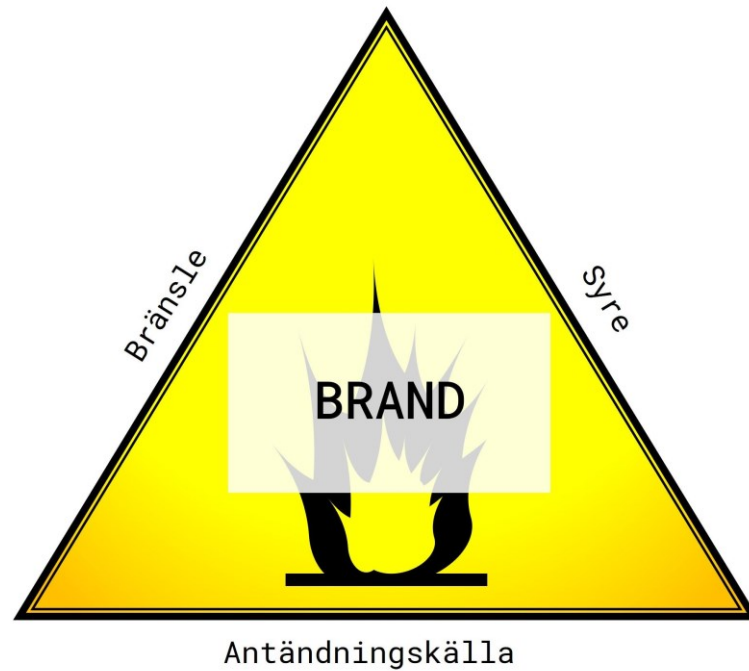
För att inte ämnet skall självantända så krävs en grupp eller klassificering för självantändning. Utifrån temperaturen bestäms klassificeringen och delas in från T1 till T6.

Vätgas som har hög självantändningstemperatur ca 560 °C, infaller i kategori T1, tabellen över de olika temperaturklasserna hittas i figur 5. Märkningen för komponenter och utrustning redogör vilka klasser, explosionsskydd och utrustningsgrupp de har. Figur 4 illustrerar hur en märkning kan se ut och vilka ATEX-direktiv den representerar.



Figur 5. Exempel på märkning av ATEX-direktiven. (Ppminindustrial, 2020)

Hur förhindras en explosion? Det finns tre grundstenar i hur en explosion bildas: ett bränsle (gas eller flytande), syretillförsel och en antändningskälla. Elimineras någon av dessa tre kan inte explosion uppstå, utmaningen är att det är svårt att fullständigt eliminera någon, främst syret och bränslet. Därför krävs det ATEX-direktiv för el-utrustning i omgivningar med explosiv atmosfär. Det är en åtgärd som kan kontrolleras av något bättre verksamhetsutövaren än de två andra alternativen.



Figur 5 Tringel som avbildar vilka tre saker som krävs för att generera en explosion. (Grahl, 2021)

Det finns åtgärder för att minimera risken för explosiv atmosfär, som tex. kraftig luftomväxling, förhindra bränsleläckage eller att förhindra syretillförseln. Att förhindra läckage av bränsle eller syre är svåra åtgärdsmetoder men kraftfulla och effektiva. Exempel på att förhindra syretillförseln är att byta ut omgivningen från luft till en inert gas som kväve eller argon. Det löns att noggrant bedöma riskerna och enligt det bedöma väsentliga åtgärder. (SFS, 2012)

Tidigare lösningar för att förhindra explosionsrisker är användning av kraftig ventilation och att förhindra syretillförsel. Ett exempel är ett projekt gjort i Norge dit Wärtsilä bidrog med ett koncept för en vätedriven färja. Med flytande väte som bränsle och bränslecell med elmotorer till drivningen. Där var tankutrymmet och bränslecellen helt i syrefri miljö, i trycksatt kväve. Rörsystemet var dubbelrörskonfiguration och trycksatt kväve runt manteln av inner rörets ytterdiameter. En väldigt säker men mer sofistikerad lösning, mer kring intervjun hittas i bilaga 2. (Terje, 2020)

Det går också att reducera riskzonens klass från låt oss säga från zon 1 till zon 2, det kan göras med kraftig ventilation och på det viset reducera på hur ofta explosionsfarliga atmosfären uppstår. Då blir det mindre krav på inkapslingar och utrustningskategorier för ATEX-utrustningen i riskzonen som påföljd, oberoende ska explosionsgruppen vara klassificerad för vätgas, alltså IIC.

2.7.2 Arbetsgivarens skyldigheter

Arbetsgivaren har skyldighet att kartlägga alla möjliga risker som orsakas av explosiv atmosfär och vilka sannolika konsekvenser som riskerna medför. Vid kartläggningen behöver det beaktas vad sannolikheten för att en explosiv atmosfär bildas samt varaktigheten. Samtidigt ska möjliga tändkällor som finns i riskzonerna samt antändningsorsak bedömas. Då kartläggningen av riskerna gjorts skall lämpliga åtgärder vidtas för att förhindra explosioner. Detta kan göras för att förhindra att explosiv atmosfär bildas och att undvika att det antänds och att säkerställa arbetstagarens hälsa med att begränsa effekten av en explosion enligt §6 i *Statsrådet förordning om förebyggande av fara som explosiv atmosfär orsakar arbetstagare*. (Statsrådets förordning av fara som explosiv atmosfär orsakar arbetstagare 576/2003, 2003). Kartläggningen kan ske med sakkunniga inom området.

Verksamhetsutövaren har en skyldighet att sörja och beakta farliga kemikaliers upplagring, information, egenskaper, miljökonsekvenser, explosionsfarlighet och brandsäkerheten för de kemikalier som hanteras. Och att sörja för personalen och ge tillräcklig utbildning om anläggningen som förutsätter för säker användning och drift. (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005)

Då det gäller riskhantering och säkerhetsåtgärder har verksamhetsutövaren skyldighet att bedöma alla säkerhetsrisker för att bestämma sannolikheten och de faktiska riskerna som de utgör. Till allt i dess omgivning, som människor, anläggning, miljö etc. Alla risker, analyser och identifikationer skall dokumenteras och läggas i ett register, ledningen ska med en bestämd frekvens gå genom registret. För att dela på informationen behövs en väl utformad kommunikationskanal för olika ärenden, allt från nödlägen till allmänna ärenden. (EN15399)

Ett väl informerat och beskrivande säkerhetshanteringssystem behöver upprättas, vilket går genom företagets säkerhetspolicy, syftet, alla säkerhetsaspekter, säkerhetsriskhantering, referenser till lagar och standarder samt intern och extern kommunikationskanal. (EN15399)

Arbetsgivaren skall också utfärda ett explosionsskyddsdocument. Det bör innehålla vilka alla explosionsrisker som finns och bedömning av betydelsen, lämpliga åtgärder för att uppnå syftet med förordningen (Statsrådets förordning av fara som explosiv atmosfär orsakar arbetstagare 576/2003, 2003) och rätt zon- och utrustningsklassificering enligt den bedömning som framställs. Mer information hittas i *Statsrådet förordning om förebyggande*

av fara som explosiv atmosfär orsakar arbetstagare. (Statsrådets förordning av fara som explosiv atmosfär orskar arbetstagare 576/2003, 2003) 8§.

3 Metod

Metoderna för att få till stånd det mål som har satts för examensarbetet är många, det här kapitlet beskrivs mer noggrant tillvägagångssättet. Det finns mycket information kring bränslet väte och dess kemikaliska egenskaper, mindre kring praktiska upplägget av bränslesystemets installation. Information kring säkerhetsåtgärderna vid lagring och hantering finns det gott om. Myndigheter, förordningar och lagar bidrar med mycket information. Standarder finns också tillämpade på olika områden av systemet som bidrar med godtycklig information och ger en bra vägledning för dimensioneringen av bränslesystemet.

3.1 Litteratur

Att hitta litteratur och information om största delen av områden gick relativt lätt. Väte är ett mycket känt grundämne och mycket studier kring väte har gjorts under en lång tid. Då tekniken utvecklas och går framåt behövs både tidsväsentlig information såväl som äldre bekräftade studier och information. Med böckernas hjälp erhålls den välstuderade aspekten och informationen, medan med hjälp av intervjuer, tidskrifter och artiklar erhålls den nya informationen inom området.

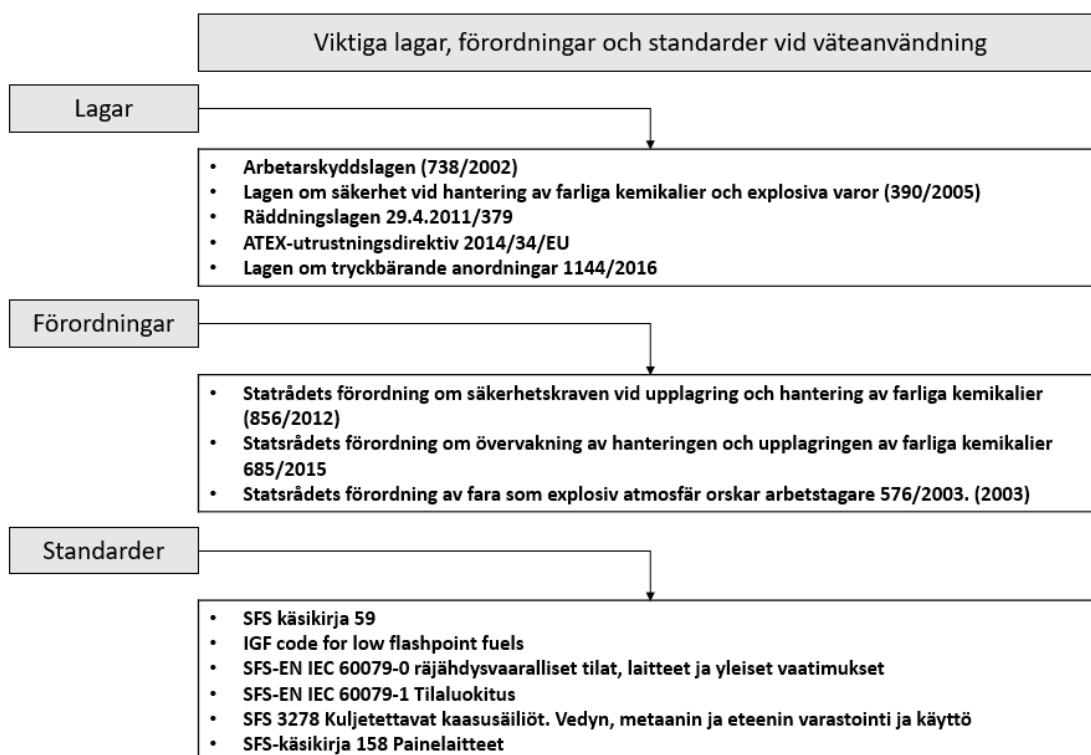
Andra delområden, som det praktiska arrangemanget, fanns det mer begränsad information om. Mer empiriska data om användningen av vätgas som bränsle var betydligt mer begränsad. Fastän det fanns information är den oftast till andra användningsapplikationer, så som bränsleceller. Databaserna är till bra hjälp för att hitta främst empirisk information om användningen av väte, statistiken över olyckor och litteratur om användningskriterier med väte. EU har en databas som heter Hydrogen Europé, där samlas information om projekt, regler och nyheter. En likadan databas finns också i USA som heter H₂Tools, de här två databaserna är mer baserade sig på de nationella projekten, lagarna och nyheterna. Där finns information om hela produktionskedjan, från tillverkning, produktion till användning och säkerhet. Kring säkerheten finns en skild databas som heter hysafe.

För att fördjupa kunskapen inom området, gjordes intervjuer med sakkunniga inom området som har arbetslivserfarenhet av likande, främst för designen och det praktiska arrangemanget av ett vätgasbränslesystem. Det gav bra insikt och kunskap om området. I bilaga 2, finns bland annat intervjuanteckningar från en intervju. Den andra intervjun gjordes med en expert inom väte säkerheten, han är från Norge och har tidigare bland annat jobbat på DNV-GL. (Olav Hansen, 2020)

För att ta reda på vad som krävs till tillståndet för hanteringen används främst information från myndigheter och lagar. Tukes är den myndighet i Finland som bland annat ger tillstånd för kemikalieanvändning. Från deras webbsida fås mycket information om hur tillståndsförfarandet ser ut, och referenser till både lagar, förordningar och standarder. Därför är också mycket information och källor från myndigheterna, främst då Tukes.

3.2 Lagar, förordningar och standarder

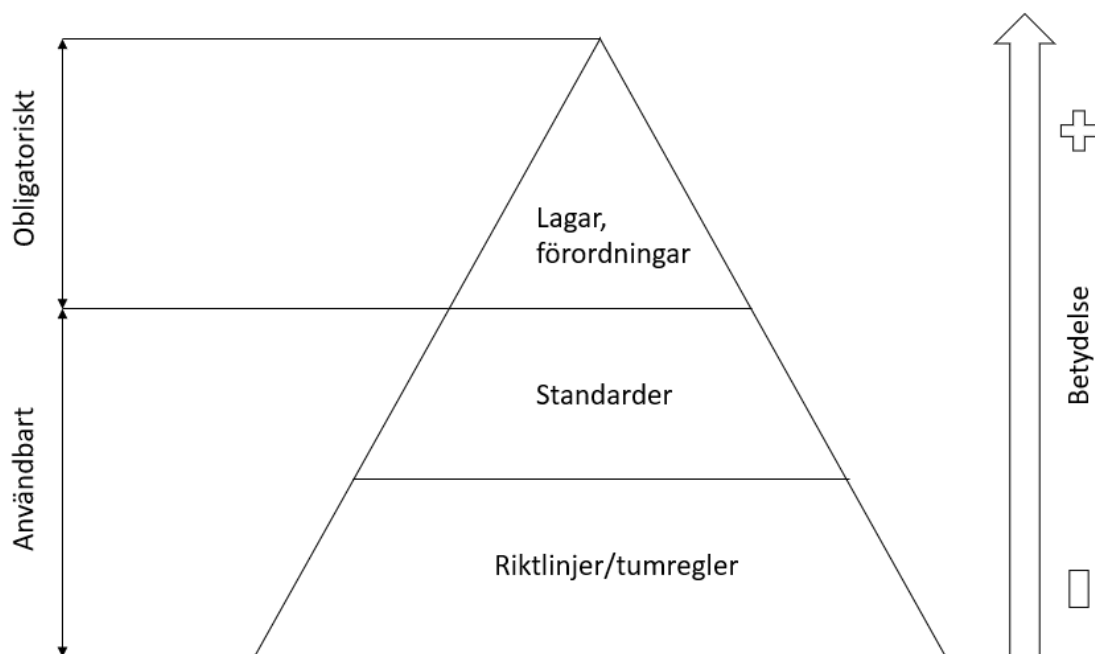
Det här kapitlet sammanfattar lagar, förordningar och standarder som används i examensarbetet. De viktigaste lagarna från myndigheten samlas hit och samma gäller för Finlands nationella lagar och förordningar. Standarderna är både nationella och internationella standarder.



Figur 6. Här syns de viktigaste lagarna, förordningarna och standarderna vid användning av väte industriellt.

Följande direktiv kan läggas till som inte är nämnda i figuren ovanför, Lågspänningsdirektivet 2014/35/EU och Maskindirektivet 2006/42/EG.

Lagarna och förordningarna är både på nationella och på EU nivå, de är obligatoriska. Medan standarder är mer standardiserat tillvägagångsätt som används i industrin, de är dock inte obligatoriska om inte myndigheten kräver att en viss standard följs. Riktlinjer och tumregler är tillvägagångsätt som industrin använder sig av är inte heller obligatoriska men väldigt användbart. I figuren nedan syns ordningen i en viktighetstriangel.



Figur 7. Lagar, förordningar och standarder i viktighetsorder.

3.3 Analys

För att ta reda på vilka komponenter, skyddsåtgärder, materialval och utrustning som krävs för användning med vätgas, så skall mycket information och data analyseras. Informationen som samlas ska analyseras och sammankopplas ihop för att få en uppfattning om vad som behöver åtgärdas i motorcellen. Ritningar och produktblad används för att analysera det befintliga gassystemet. Där framkommer all väsentlig information för att kunna bedöma omfattningen av åtgärderna, t.ex. så sätts hårdare krav på el-utrustning i en explosiv atmosfär

utformat av väte än av metan, som nämndes i teorin att kravet ändra på explosionsklassen från IIA till IIC för vätgas. Då gäller det att analysera alla komponenters ATEX-märkningar så att de uppfyller kravet för vätgas.

Då det gäller GVU, så kontaktades tillverkaren skilt för att få deras kunskap och information. De bekräftade också användning av vätgas som bränsle i den befintliga GVU inte är lämpad för vätgas, eftersom den är främst designad för naturgas som bränsle. Det bidrar till bedömningen om en helt ny GVU kunde vara lösningen.

En viktig informationskälla är från intervjuerna från experterna. Där fick jag svar på väldigt specifika frågor gällande just Vasklot anläggningen. Vilka olika saker som är bra att tänka på då vätgas används både gällande lagringen, rörsystemet, säkerhetsåtgärder, övervakning och tips till databaser där mer information hittas om området.

4 Tidigare studier

Det finns begränsad information om tidigare studier om användning av vätgas i förbränningsmotorer. Wärtsilä har nu börjat utveckla och är i startgroparna i forskningen av väte som ett potentiellt bränsle för deras motormodeller, framför allt användning av ren vätgas.

Det fanns tidigare planer på att testa vätgas i en Wärtsilä 32 motormodell år 2002. I samarbete med FC Chemicals, som tillverkade natriumklorat och natriumhypoklorit till träförädlingsindustrin genom elektrolys. Företagets tillverkningen av natriumklorat var världsledande med en produktionsvolym på 400 000 ton per år. Vid tillverkningen av en ton natriumklorat uppkom vätgas som en sidoprodukt på 56 kg, vilket motsvarar 6000 ton per år eller 30 MW i värmeenergi. Själva industrin, över hela världen, producerade vätgas upp till 3000 MW. Därav föddes tanken att börja utveckla och testa vätgas som bränsle redan för 20 år sedan i samarbete med FC Chemicals. Målet var att testa på en cylindrig motor först, sen att testa på en flercylindrig motor vid Äetsä där FC Chemicals är belägen och slutligen introducera en ny produkt, en 18 cylindrig Wärtsilä W1832DF som kan köras på vätgas. (Wärtsilä, 2001)

Projektet avslutades innan motortestandet påbörjades. År 2015 så tog utvecklingen ny fart, då vätgas blandades med naturgas som bränsle åt Wärtsilä 34 SG-motor och 34 DF motor, för laboratorietester. Hanna Berg skrev examensarbete om just testningen och tog upp hur förbränningen påverkas med tillsats av väte i bränslet samt vilka åtgärder som bör göras på motorerna så att det möjliggör blandning upp till 30 % volymvätgas. I examensarbetet tas också upp det praktiska arrangemanget i motorcellen och vilka olika säkerhetsåtgärder som gjordes. (Berg, 2015)

Efter Hannas diplomarbete är inställningen nu att testa med 100 % rent väte i en Wärtsilä motor. Efteråt påbörjades två diplomarbeten om två motorkoncepters kompatibilitet med väte som bränsle, Philip Westberg som skrev om DI motorkonceptet och Alexander Ehlers som skrev om Otto motorkonceptet. De gjorde en noggrannare undersökning kring användningen av väte för de olika motorprinciperna och redogjorde vilka åtgärder som krävs för att lyckas med väte som bränsle, främst kring förbränningen och redogörelse över nödvändiga materialval. Nästa steg i forskningen är att tillämpa principerna i en motor, det här examensarbetet behandlar förberedelsen för vätgasdrift till motorcellen.

5 Modifiering av testcell för vätgasdrift

Vid modifiering av testcell behövs på förhand kunskap om vad och vilka saker som skall åtgärdas, fokuset med projektarbete är att presentera nödvändiga förändringar i testcellen för vätgasdrift.

Testcellen som skall modifieras är belägen i Vasklot. Motormodellen är en Wärtsilä 31 SG med endast en cylinder och en effekt upp till 600 kW. Bränslet som används är flytande naturgas LNG, förbränningen sker dock i gasform. I figur 5 syns en flygbild på Vasklot anläggningen.



Figur 8. Flygbild över Vasklot motorlaboratoriet från år 2020.

Några saker som detta kapitel går genom är kravet på tillstånd, lagringen och hanteringen, säkerhetssystemet, bränslesystemet och säkerhetsåtgärder. Det som presenteras är inga faktiska resultat utan enbart planering och teoretisk hur åtgärderna och genomförandet kan se ut.

Teorin tar upp det väsentligaste när det gäller användning av vätgas, börjades från ämnet till skyddsåtgärder. Där nämns också hur tillståndsförfarandet ser ut för olika hanteringsmängder. Det här kapitlet applicerar teorin till Vasklotanläggningen var placeringen sker, användning av vätgas inomhus och andra väsentliga åtgärder gällande anläggningen i Vasklot. Därför gjordes också intervjuer med sakkunniga som har erfarenhet kring hanteringen av vätgas i liknande omständigheter som i Vasklot, för att få specifika svar. Projektet börjar med att få tillstånd för hanteringen av Tukes, nästa kapitel går genom hur tillståndsförfarandet går till.

5.1 Tillstånd

Lagringsmängden är uppskattad till ca 150 kg. I teorin om tillståndskrav, krävs endast anmälan till lokala räddningsmyndigheten för 150 kg vätgas. Men eftersom relationstalet från ekvation 1 är högre än 1 behövs tillstånd för hanteringen av Tukes. Varför relationstalet blir högre än 1 är för att det lagras både naturgas (LNG) och propan (LPG) på området i stor omfattning.

Tillståndsansökan ska göras i enlighet med *statsrådets förordning om övervakning av hanteringen och upplagringen av farliga kemikalier 685/2015 bilaga II*. I bilaga 5 finns ett sammandrag av vad ansökningen bör innehålla.

Eftersom motorn fortfarande kommer att köras på både LNG och LPG i fortsättningen, krävs ett s.k. byggnadstillstånd för naturgasrörsystem. I det här fallet så uppfyller utbyggnaden, kriterierna för byggnadstillstånd, ansökningen och blanketten hittas från Tukes nätsidor. Skulle endast vätgas hanteras är ett byggnadstillstånd inte nödvändigt (Tukes, Byggnadstillstånd för bio-och naturgas, u.d.).

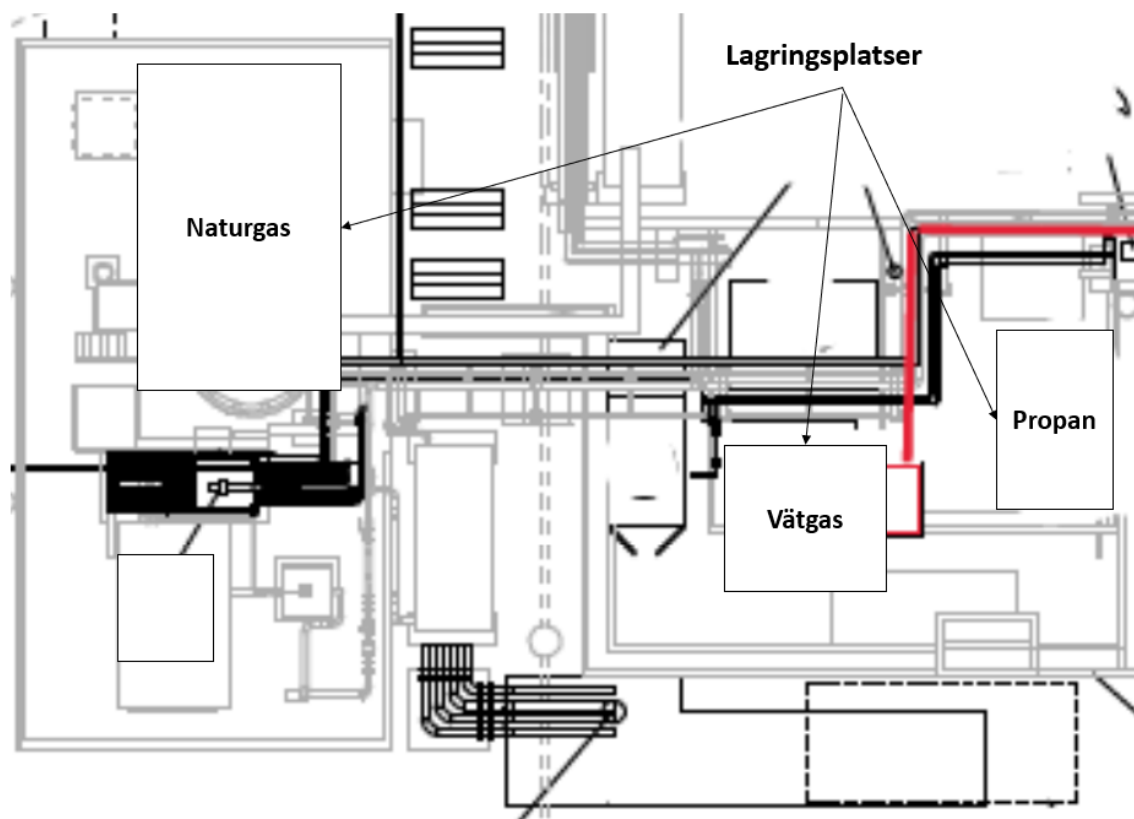
5.2 Lagring och hantering

Lagringen av vätgasen som nämndes i förra kapitlet kräver tillstånd från Tukes för omfattande hantering av farliga kemikalier. Lagringen för vätgasen vid Vasklot anläggningen sker utomhus och placeringen är avsides från resten av verksamheten på en säker plats. Lagringsplatsen är gemensam med andra bränslen som används på området, den ligger ca 100 m från motorcellen, därifrån dras rör till motorcellen, i bilaga 4 syns lagringsplatsen och rördragningen till motorcellen, det syns också i figur 9.

Vasklot anläggningen hör till en produktionsanläggning som hanterar och lagrar omfattande mängder farliga kemikalier. Det som ska säkerställas att den kategorin inte förändras då mer bränslen tas in på fastigheten, för att planeringskraven ändras då det når en ny nivå med andra kriterier.

Som teorin om lagring och hantering tar upp gäller det att beakta andra bränslen så att olycksriskerna kan minimeras och därav konsekvenserna från en olycka. Då vätgasen läcker

ut med högt tryck kan en lång jet liknande (upp till 10 m) eldstråle bildas. Därför är säkerhetsväggar runt vätgaslagringen en bra säkerhetsåtgärd för att förhindra att det antänder andra bränslen som lagras på samma område. Figur 9 nedan visar hur lagringsplatserna förhåller sig till varandra för de olika bränslen som lagras på samma lagringsplats. Då det gäller minimum avstånd ska den sammanlagda hopräknade mängden farliga kemikalier användas då beslut på minimum avstånd görs.



Figur 9 Lagringsplatserna för naturgas, vätgas och propan vid lagringsplatsen.

Det finns olika alternativ beroende på leverantör hur vätgasen levereras. Woikoski levererar gasen i en container där flaskorna är ihopkopplade, trycket ligger kring 200 bar och en mängd på ca 150 kg. För att kontrollera och hantera trycket från lagringen till rörsystemet krävs tryckreduceringsventiler direkt efter lagringsflaskorna. Undvik el-kontrollerade ventiler eftersom de kan bilda en antändningskälla och ATEX-direktiven bör följas (vilket det infaller i). En viktig funktion med lagringen är att ha säkerhetsventiler, och avstängningsventiler för att kunna kontrollera och undvika förödande situationer. Till klassen säkerhetsventiler hör, bakslagsventiler och övertycksventiler. Bakslagsventilen tillåter att vätgasen endast kan åka en väg, och övertycksventiler släpper ut övertryck.

Eftersom vätgasen kommer i container är riskzonen reducerad. Den riskzon som bildas utanför containern är riskzon 1, närmast anslutningen, ca 1,5 meters radie blir riskzonens utsträckning. Därför är det också lämpligt att tryckreduceringsventilen är mekaniska så undviks ATEX direktiven. Det som begränsar riskzonens utsträckning i riktning mot propanlagringen är skyddsvägg. Andra riskzoner som bildas vid lagringsplatsen är vid avgasningsrörets utlopp vilket bildar en riskzon på 1. Ventilen före motorcellen bildar en riskzon 2. Eftersom de flesta ventiler och komponenter svetsas fast med röret är bedömningen så att inga riskzoner bildas kring skarven. De skarv som inte är svetsade är bedömningen att mängden vätgasläckage är såpass liten då systemet används utomhus. Diffusionen med vätgasen och luften sker så snabbt så ingen explosiv atmosfär bildas.

Allteftersom testningen av motorer fortsätter behövs säkert större mängder. Energiförbrukningen är det som sätter villkoren för mängden vätgas som skall lagras på området under en viss tidsperiod. Redogörelse av hur energianvändningsprofilen kan se ut under olika typer av testkörningar bör fastställas och efteråt skraddarsy en lösning med leverantören gällande mängder, påfyllningar, kvalitet etcetera.

5.2.1 Bränslesystem

Det gamla gassystemet kräver några modifikationer för att kunna utföra tester med vätgas som bränsle. Det som teorin tar upp är de viktiga åtgärderna för att säkerställa att systemet är säkert för användning och utsätter varken människor eller omgivningen för fara. Där tas också upp de viktiga egenskaperna kring väte och ger en bra bild av vilka saker som skall åtgärdas, allt från säkerhet och materialval.

Vätgasen ska hanteras med rörsystem och gamla rörsystemet (som är designad för LNG) är otillräcklig för vätgasanvändning. Orsaken är att materialval för rörsystem med vätgas görs på andra kriterier. Teorin tar upp säkerhetsåtgärderna som ATEX-direktiv, riskzoner, annan explosionsgrupp än naturgas osv.

Rörsystemet ska planeras i enlighet med det som skrivs i teori-delen om rörsystem. Vid planeringen bör det fastställas driftstrycket, det sätter sen villkor för hur dimensioneringen av rörsystemet görs vidare. Eftersom drifttrycket kommer att vara maximalt kring 12 bar så dimensioneras rörsystemet enligt det. Men röret som används ska vara högre klassad så att röret inte havererar från drifttrycket, då kan t.ex. PN40 användas. Det innebär att rörsystemet

blir tryck klassat för PN40 alltså 40 bar. Det maximala massflödet blir kring 30 kg/h och minimi ca 2 kg/h.

Det som nämns i teorin är att, transporten av större volymer och tryck ökar risken för väteförspredning. Därför är den också planerad för ett lägre tryck, det i sin tur gör att motorn inte kan uppnå samma uteffekt som med naturgas. För att förhindra och begränsa väteförspredningen används rostfritt stål (EN 1,4404), vilket också framkom från intervjuerna att det är ett vanligt använt stål i industrin. Det som också framkom i teorin kring väteförspredning är att stål kvaliteten är preventiv till förspredningen, om valmöjlighet finns löns det att välja bättre kvalitet av det rostfria stålet.

Enligt teorin behövs ett tillstånd för naturgasrörsystem. Det krävs också vid Vasklot eftersom naturgasanvändningen fortsätter som förut. Därför kommer också det nya röret behålla samma dimension som förut, med en dimension på DN65 för stamlinjen. Linjen kopplas in parallellt med naturgas lagringen och med hjälp av ventiler kan olika bränslen användas enligt behov. Rörsystemet har också möjlighet att blanda in t.ex. propangas med naturgas i fortsättningen, som förut. I bilaga 3 finns en skiss på det tänkta bränslesystemet. Skissen är markerad med siffror som beskriver olika delar och komponenter. Lagringsplatsen är markerad som 1, motorcellen är markerad som 2 och anslutningen till naturgaslagringen är markerad som 3. Där finns också information kring rördimensioner, avgasningen och ventilerna.

Andra säkerhetsaspekter som är integrerade i rörsystemet är, avgasningen och möjligheten att inerta systemet vid reparationsarbeten. Avgasningen (markerad med en 4 i bilaga 3) görs vid reparationsarbete och då systemet stängs av, för att undvika att fickor av vätgas lämna i delar av rörsystemet. Inerta systemet betyder att inert gas som kväve ersätts med vätgas som kan finnas i systemet.

Då flera bränslekällor kopplas parallellt in i samma ledning måste det säkerställas att bränslen inte blandas ihop. Det görs med avstängningsventiler (syns i bilaga 3, markerad som 5) och bakslagsventiler som enbart tillåter att gasen leds en väg. Bakslagsventilerna (6) och avstängningsventilerna kopplas in före stamledningen. En övertycksventil (7) som öppnar vid 16 bar läggs in för att skydda systemet mot övertryck.

I teorin nämns det att för att undvika läckage ska skarv svetsas, men det är praktiskt inte möjligt, därför svetsas röret på alla skarvar där det är möjligt och resten av skarven är

bultförband. Tanken är också att ventilerna svetsas fast i röret. Då det gäller gasröret i byggnaden kommer röret att svetsas på alla ställen där det är möjligt och skarven med flänsarna som kommer att ventileras enskilt. Det går dock inte att montera ett helt stumt bränslerör från GVU till motorn, eftersom motorn rör på sig relativt till GVU och därav kan bristningar bildas. Därför behövs en flexibel del, vilket utgörs av en slang i det här fallet. Slangens material och tryckklass ska anpassas till användningsändamålet.

Gällande tätningar så skall också materialet väljas så, att det är lämpligt för vätgas. De tätningar som nu används behöver ses över. Vid GVU har iallafall PTFE-tätningar tidigare använts, men kommer att bytas ut, det har inte att göra med materialet, snarare typen av tätning är inte fördelaktigt för vätgasanvändning. NASA har tabellerat, från tester, tätningsmaterial och o-ringar som är kompatibelt för väte. Material som lämpar sig bra är Teflon PTFE, Viton FKM och Nitril NBR. Figuren nedan presenterar olika tätningsmaterial. Mer information kring materialkompatibilitet för tätningar hittas också från (Marco rubber and plastic) och i bilaga 6.

Table 11. Comparison of different sealants.[1]: ACEseals, [2]: MatWeb, [3]: Alberding, [4]: Eclipse engineering Inc., [5]: Green Tweed. [6]: San Marchi, C., 2008, [7]: Parker.

Material	Hardness (Shore A)	Temperature range	Elongation @ break	Permeability ($\frac{mol H_2}{msMPa} * 10^9$)	Performance
Nitrile (NBR)	70 [1]	-40-120 [1]	~300% [1]	1.45, @ 293 K 12.1, @ 353 K [6]	(++) Oil resistance (+/-) Wear resistance [1] (Suggested by NASA)
Viton (FKM)	70 [1]	-30-200 [1]	~220% [2]	1.51, @ 293 K 18.6, @ 353 K [6]	(+) Oil resistance (+) Wear resistance [1] (Suggested by NASA)
Polyurethane	70-90 [1]	-50-100 [1]	-300% [3]	21.2, @ 312 K [7]	(+) Oil resistance (++) Wear resistance [1]
Teflon (PTFE)	55 Shore D [4]	-200-260 [4]		3.3, @ 298 K [6]	(++) Temperature range (++) Corrosion resistance (-) Sealant (-) Inelastic [4] (Suggested by NASA)
Neoprene	40-90 [1]	-43- 107 [1]	400% [1]	4.55, @ 298 K 9.24, @ 308 K [6]	(+/-) Oil resistance (+) Wear resistance [1]
Silicone	30-80 [1]	-60-230 [1]		100, @ 293 260, @ 260 [6]	(+/-) Oil resistance (-) Petroleum [1]
FFKM	65-95 [5]	-40-325 [2]	100-300% [5]		(++) Wear resistance (++) Oil resistance (++) Temperature range [5]

Figur 10. Tabell över tätningsmaterial som är både bättre och sämre kompatibel med väte. (NASA, 1997)

Nu när det nya systemet och rörskarven blir annorlunda så ändras t.ex. typen av tätning från flänstätning till o-ringar, därför finns inga specifikationer gällande modeller osv. Endast redogörelse över lämpliga material.

Före systemet tas i användning behöver systemet tryck testas. Det görs för att säkerställa att inga läckage finns och för att myndigheterna också så kräver. Vid reparationsarbete är det viktigt att ha på sej personliga säkerhetsutrustningen och en handhållen detektor. En viktig del av reparationsarbetet är att inskaffa en arbetsorder som t.ex. heta arbeten samt att noggrant gå genom alla risker som är associerat med arbetet före arbetet inleds.

5.2.2 ATEX-direktiv

Till riskzoner hör lagringsplatsen och gastryckregleringsenheten GVU. Eftersom Tukes anser motorn som förbränningsanläggning finns inga krav på ATEX-direktiven vid motorn.

Eftersom GVU hör till en riskzon för möjligt läckage så behöver all el-utrustning som befinner sig vid GVU vara lämplig för riskzon 1 och vätgas som bränsle. Det innebär att märkningen bör innehålla följande:

- Explosionsklass II eller IIC, referat [ATEX-direktiv](#) i tabell 4
- Utrustningskategori, 1G eller 2G, referat [ATEX-direktiv](#) i tabell 3
- Explosionskyddsklasser, Ex ma, ia, ta , e, d, tb, ib, px, py, pb, mb, ob och q
- Temperaturklassificering, T1 till T6, referat till [ATEX-direktiv](#) i figur 4.

Komponent beskrivning	ATEX-märkning	Uppfyller	Material	Lämplig för väte
Pressure transmitter for over pressure P003	Eex ia IIC T4-T6	JA	EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L)	Ja
Electro pneumatic tranducer, V009 and V01	II,1 G Eex ia IIB T4	NEJ	Aluminium	Ja
Electro magnetic valve, V014 and V016, dega	IIG2 Eex Na II T4 (Zone 2)	NEJ	No material specification in brochure	Nej
Electro pneumatic valve, V015 and V018	IIG2 Eex me II T4/T5(Zone1)	JA	Cast steel	Nej
Pressure transmitter for over pressure P006	Eex ia IIC T4-T6	JA	EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L)	Ja
Electro magnetic valve, V019	DE Ex nA II (Zone 2)	NEJ	EN 1.4301 (304)	Ja
Control box, BLR0_2	II 3 G EEx e[ial IIC T5/T6,	NEJ	Not in contact with hydrogen	-
Junction Box	II 2 G EEx e II T5/T6	JA	Not in contact with hydrogen	-
Electro magnetic valve, V024, degas	II 2G EEx nA II T4X1350 (Zone 2),	NEJ	No material specification in brochure	Nej
Electro pneumatic valve, V0125,28	IIG2 EEx me II T4/T5, (Zone 1),	JA	Cast steel 1.0619N	Nej
Electro-magnetic-valve, V026, degas	113G/DE Ex nA II T4X135C (Zone 2),	NEJ	Material 1.4301(304)	Ja
Pressure transmitter for over pressure P009	II 1 G EEx ia IIC T4-T6,	JA	EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L)	Ja
Electro-magnetic-valve, V029, degas	113G/DE Ex nA II T4X135cc (Zone 2),	NEJ	Material 1.4301 (304)	Ja
Micro motion massflow sensor (pilot)	Ex II 1/2 G Ex ib IIC T5..T1	JA	316 L	Ja
Micro motion massflow sensor (main)	Eex ib IIB/IIC T1..T5 (Zone 1)	JA	316 L	Ja
Micro motion transmitter to both sensors	Ex d ib IIB+H2 T5	JA	Not in contact with hydrogen	-
Circuits, wiring	Eex ia IIC	JA	Not in contact with hydrogen	-

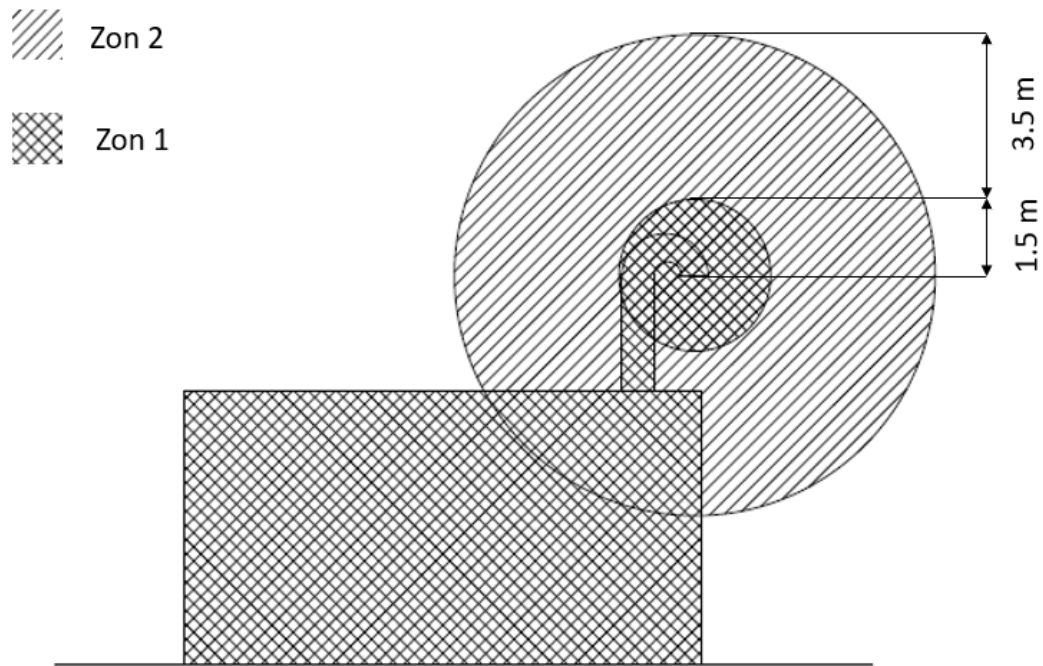
Figur 11. Bild över all el-utrustning med ATEX- märkning och materialkompatibilitet med vätgas. Vid ATEX märkningen syns de kriterier som gör att klassen uppfyller eller inte uppfyller nivån för riskzon 1 och vätgas som bränsle. Bedömningen av lämpligheten för materialvalet till komponenterna grundar sig på bilaga 1.

Det som presenteras i figuren ovanför är en undersökning på vilka el-komponenter som behöver bytas ut. GVU är konstruerad för naturgas, vilket innebär att riskzonen är 2 och materialet är inte lämpligaste för vätgas. Tillverkaren bekräftade att vätgasanvändning är på egen risk, främst på grund av materialet i alla delar på GVU. Konkret innebär det, enligt ATEX-direktiv och materialkompatibilitet, att de flesta komponenterna behöver bytas ut. Det som inte behöver bytas ut är tryckgivare, flödesgivare, temperaturgivare, kopplingsbox och

elkablar. Sensorerna kommer att användas till den nya GVU som planeras för vätgasanvändning.

Klassificeringen gäller också för all utrustning som är i riskområde och där det kan bildas explosiv atmosfär, som t.ex. ventilationsaggregat behöver vara enligt ATEX-direktiven. Det gäller främst den externa ventilationen som koncentreras till läckageplatser. När det gäller byggnadens egna ska en riskbedömning göras, eftersom den inte är ATEX-klassificerad. Alternativ byta ut till en lämplig för vätgasanvändning.

Andra platser där riskzoner bildas är från vevhusventilation (luftomväxlingen i motorn), externa ventilationens utlopp. Vilket kräver att dragningen av utloppsröret ska placeras på lämpliga plaster och att vevhusventilationens fläktar ska vara explosionsklassificerade för vätgas med märkningen IIC eller II. I figur 14 nedan syns riskzonerna för frånluftsventilationsrör. Samma sak gäller också för elektrisk utrustning vid lagringsplatsen, dit kommer elektriskstyrda ventiler och mätinstrument osv. Styrningen av ventilerna kan också ske med tryckluft, det underlättar vid riskzoner, då större strömstyrkor undviks. Det som ska beaktas är att då explosionsklassen ändras från IIA till IIC ska alla riskzoner där vätgasen inverkar ha klassen IIC eller II enligt tabell 4. Det kan betyda att utrustning som har tidigare använts i naturgasledningen inte kan användas, om inte explosionsklassen är förstås IIC.

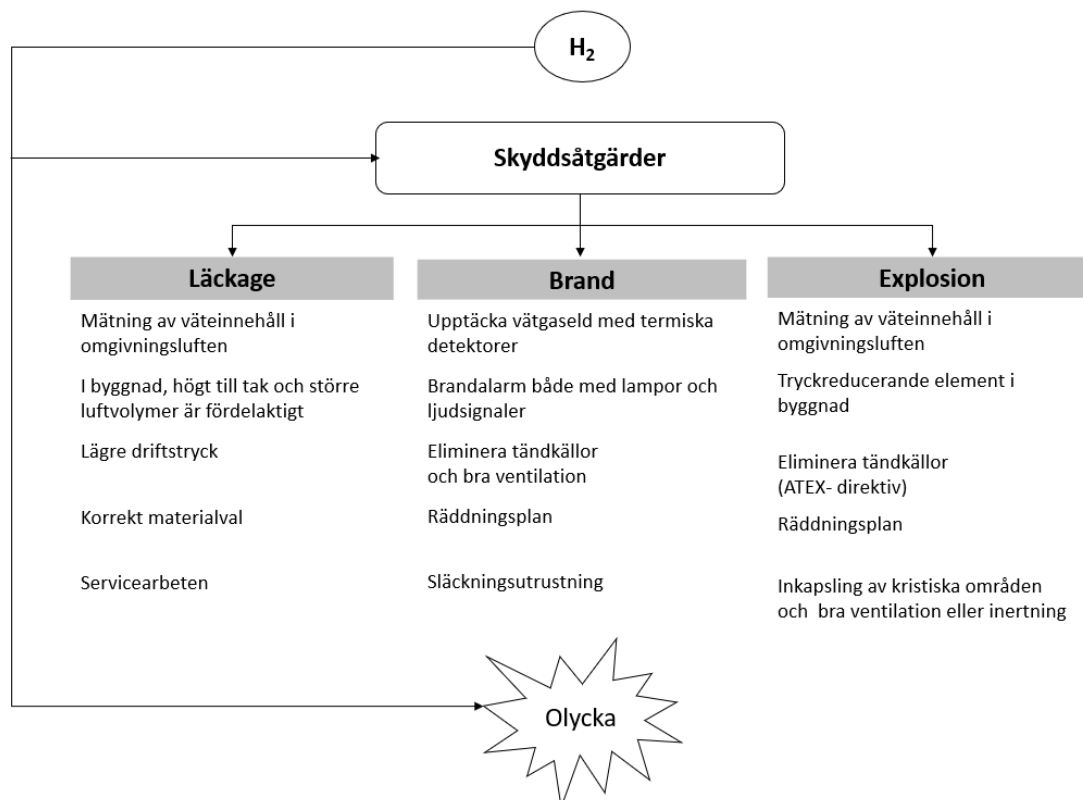


Figur 12. Riskzonernas omfattning från t.ex. frånluftsventilationsrör. Modellen till bilden är tagen från SFS käsikirja 59. (SFS, 2012)

Andra säkerhetsåtgärder behövs också för att säkerställa att inga läckage, brand och explosioner sker. Nästa kapitel behandlar vilka andra säkerhetsåtgärder som krävs i en byggnad och mer specifikt en motorcell.

5.3 Säkerhetsåtgärder

Säkerhetsåtgärder kan beskrivas som åtgärder för att säkerheten inte riskeras både för personal, miljö och egendom. Vid hantering av explosionsfarliga gasen väte så är det strängare säkerhetskrav i jämförelse med naturgas. Som nämndes i teoridelen, den låga antändningsenergin, breda explosionsområdet och svårigheten att se lågor. Det är främst att förhindra läckage, explosion och bränder. Figuren nedan beskriver de viktigaste skyddsåtgärder för de olika olyckorna.



Figur 13. Bilden illustrerar de skyddsåtgärder som kan tas för att förhindra olyckor med vätgasanvändning. Skyddsåtgärder delas in i tre olika sektioner vilka representerar olika typer av olyckor.

5.3.1 Övervakning

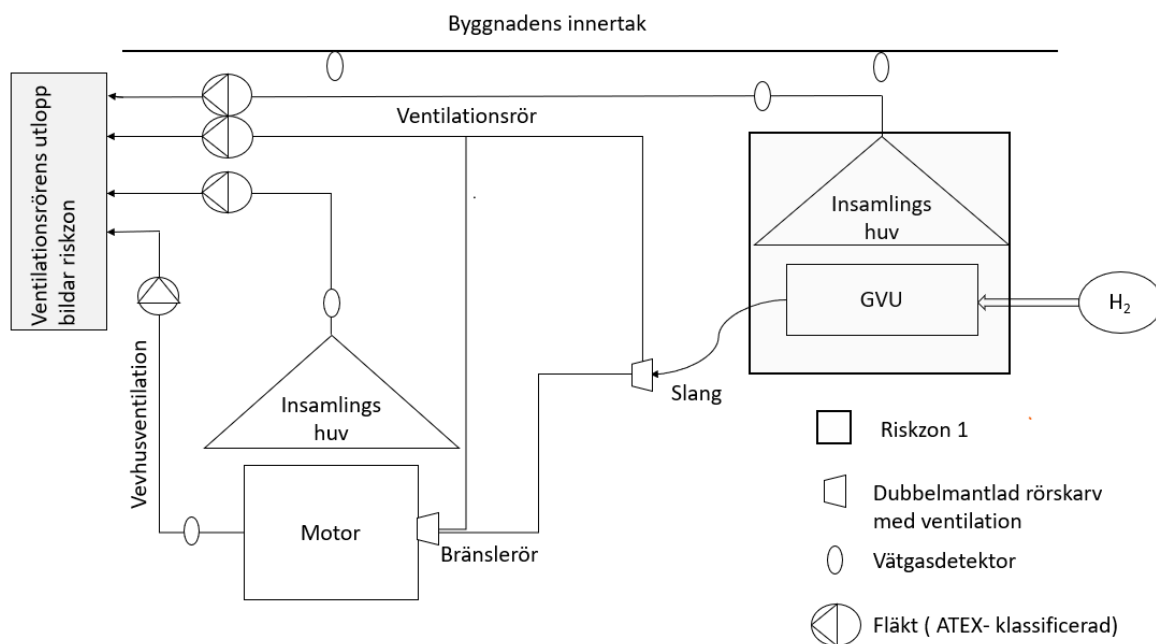
Övervakning kan ske på olika sätt, som till exempel mätning av tryck, temperatur, läckage, flöde, brandövervakning osv. Ur säkerhetssynpunkt så är läckage, explosion och brandövervakningen de viktigaste. I teoridelen räknas de viktigaste åtgärderna upp kring användningen av vätgas inomhus eller i byggnader, övervakningen är en viktig del av åtgärderna. I teorin, från säkerhetskrav, hittas statistik över olyckor som har tidigare skett i industrin i USA mellan åren 1969–1977 att 22 % av olyckorna är p.g.a. upptäckta läckage. Därför är övervakningen så viktigt.

Läckageövervakningen som tidigare nämnt är viktig, speciellt inomhus. Syftet med mätsensorerna är att interaktivt mäta tillståndet på andelen vätgas i luften och bidra med att förhindra olyckans omfattning, som t.ex avstängning av bränslesystemet vid för högt LFL värde. Mätsensorerna som övervakar andelen vätgas i luften ska placeras på strategiska platser för att åstadkomma den absolut lämpligaste och trovärdigaste mätresultatet. Ett säkert avstängningsvärde är ca 25 % av vätgasens LFL-värde, vilket är 1 % väteinhåll i luften. Därför ska också ett lämpligt mätintervall användas så att inte mätosäkerheten infaller kring 1 %. Mätintervallet, placeringen, omgivningens tillstånd ska beaktas då planering av övervakning görs, speciellt om detektor läggs i ventilationskanaler där lufthastigheten är hög. Om förutsättningar för ett bra mätresultat åstadkoms, så kan mätresultatet användas som data till kontrollsystem.

För att säkerställa att övervakningens instrument läggs på strategiska platser och för att få det trovärdigaste mätresultatet bör följande saker beaktas:

- Placeringen, t.ex. ovanför GVU, motor eller vid potentiella läckage platser.
- Mätintervallet, lämpligaste mätmetoden.
- Mättillståndets kriterier, t.ex. vissa sensorer ger endast trovärdiga resultat vid statisk omgivning, vilket betyder att luften kring sensorn inte rör på sig.
- Temperaturer, mätning av väteinhåll kan inte mätas på högre nivåer än dess självantändningstemperatur, så under 560 °C.

I figuren nedan syns en schematisk skiss över den externa ventilation och detektorernas placering i motorcellen. Ventilationskanalerna planeras skilt för att specifikt veta var läckage kommer ifrån och för att ha ett tillräckligt undertryck i ändan av röret. Detektorerna är av den typen att den tar en mindre mängd luft som den analyserar, för då lufthastigheten är så stor i ventilationskanalen åstadkoms inget trovärdigt resultat.



Figur 14. Här syns layouten för övervakningen och detektorernas placering. Bränsle kommer från lagringsplatsen och vidare till GVU. Ventilationen görs på följande vis, två insamlingshuvor ovanför motorn och GVU:n, vevhuset och rörskarven förses också med ventilation. I alla ventilationskanaler placeras en detektor, det är främst för att veta mer specifikt varifrån läckaget kommer. I layouten finns inte byggnadens egen ventilation med. Ovanför i innertaket både vid motorn och GVU placeras en detektor. Det som också ska tas till beaktande är att fläktarna ska vara ATEX-klassificerad och riskområdena zon 1 bildas vid GVU och vid ventilationrörens utlopp.

Brandövervakningen för byggnaden är den samma som tidigare och inga särskilda tilläggsåtgärder görs. Som släckningsutrustning kan vatten, pulver eller skum, dock inte koldioxid användas. Motorcellen är utrustad med ett sprinklersystem med vatten, den förblir densamma och fungerar som släckningsutrustning. En option till övervakningen kunde vara termisk övervakning, eftersom lågan inte syns så kan lågan heller inte upptäckas med människoögat. En kamera med infraröd laser kunde vara lösningen för att upptäcka lågor.

För att reducera chansen för olyckor kan data från övervakningen användas. Till bränslesystemet kommer det att läggas till en automatstyrd ventil på bränslesystemet, den stänger av bränsleflödet enligt behov. Behovet att stänga av ventilen kan komma från för högt LFL-värde i motorcellen, alltså den överstiger tröskelvärdet 25 % LFL. Med den åtgärden kan olyckans omfattning reduceras, ifall en olycka hinner ske före avstängningen av ventilen.

Säkerhetsåtgärder med kontrollsystem:

- Stänga av bränsletillförseln till motorn (ventilen är utanför motorcellen, syns i bilaga 3 markerad som 5), då det når tröskelvärdet.
- Stänga av motorn, då det når tröskelvärdet.
- Ventilation måste vara på före motorn kan startas, lämnas på, ifall motorn stängs av på grund av att det når tröskelvärdet för avstängning.

5.3.2 Andra skyddsåtgärder

Det finns andra olika skyddsåtgärder för att förhindra att läckage, brand och explosion. Som nämndes i teoridelen kring användning av vätgas inomhus så finns det en hel del säkerhetsåtgärder. Dit hör bland annat:

- Ventilation eller luftomväxling, det är en effektiv metod för att förhindra formationen av vätgas till något ställe:
 - Varför ventilationshuvorna (figur 16) placeras ovanför både motor och gasregleringsenheten (GVU) så är för att kontrollera de potentiella läckage som antas komma vid motorn och GVU. Tanken är att majoriteten av läckaget fort samlas upp och körs ut. Det som man bör beakta är att lufthastigheten är turbulent i röret och blandningen med vätgasen blir mycket homogen, därav så bildas också riskzon vid utloppet av ventilation röret, som nämndes i tidigare kapitlet kring ATEX-direktiv.
 - Teorin tar upp vilka saker som gäller för materialet för ventilationssystemet, att det ska skydds jordas och att antistatiska material ska användas. Med det sagt så kan ventilationshuvorna (syns i figur 16) vara gjorda av stål (möjlighet till skydds jordning) och används slangar eller andra material som kan komma i kontakt med den explosiva atmosfären, så bör de vara anti-statiska.
- Begränsa användningsvolymerna och driftryck med vätgas och ha stora volymer luft i omgivningen, företrädesvis utomhus:
 - I teoridelen tas upp effektiva alternativ vid användning av vätgas inomhus, som kraftig ventilation, se till att inte explosiva atmosfären sprids vidare in i byggnaden och förbereda en räddningsplan. Där tas också upp vikten av att koncentrera ventilationen till potentiella läckageplatser och till takhöjder. I

figur 4 syns en jämförelse hur byggnaden bör vara orienterad, alltså högt till tak snarare än lågt, motorcellen i Vasklot är mycket högt till tak vilket är fördelaktigt. Fördelen är att vätgasen samlas högt upp i innertaket. För att förhindra att explosiva atmosfärer åker vidare till andra delar av byggnaden, kan byggnadens egen ventilation bilda ett litet undertryck i motorcellen. Där behövs också en bedömning ifall ventilationsaggregatet ska bytas ut till en ATEX-klassificerad eller om den förblir oförändrad. Drifttrycket är på samma nivå som vid naturgasanvändningen, ca 12 bar, vilket också är en fördel för både väteförspredning och läckage.

- En annan säkerhetsåtgärd för att veta eller begränsa den maximala mängden vätgas som potentiellt inträffar från läckage, med andra ord begränsa volymflödet. Detta begränsar oftast konstruktionen av GVU, men det är bra att ha i eftertanke också vid riskanalyseringen. Vid riskanalyseringen krävs också en redogörelse av maximala volymflödet som kan läcka ut.
- Förebyggande underhåll och granskningsintervaller av utrustning, komponenter, tätningar, eller rör:
 - Utrustningen ska gås genom före användningen, efteråt ska både kalibrering av detektorer utföras och annan utrustning okulärt besiktas.
- Tryckreducerande vägg eller element för att leda bort explosioner eller alternativt inkapslingar av explosionskänsliga områden eller delar:
 - Vid riskanalyseringen bör det redogöras ifall det är nödvändigt med tryckreducerande vägg eller element för motorcellen. Inkapsling av GVU kan vara en lösning för inkapsling och skydda omgivningen från explosion såväl som förhindra formationen av explosiv atmosfär i motorcellen.
- Inerta inkapslingar med inert gas för att förhindra explosiv atmosfär:
 - Till motorcellen i Vasklot kommer inte inert lösning användas i dagens läge, möjligtvis om det krävs utifrån testningen så finns alltid möjligheten att implementera en liknande lösning. Som t.ex. inerta rörskarven med kväve eller en liknande lösning.
- Helsvetsade rör med dubbelmantlad rörskarv, som är ventilerande:

- Rörsystemet kommer att hel svetsas i alla skarvar där det är möjligt. Om inte det är möjligt kommer rörskarven att vara med flänsförband och tätning. Rörskarven inne i byggnaden kommer att vara dubbelmantlade och ventilerade för att förhindra riskzonens omfattning.
- Personlig skyddsutrustning:
 - Det som tidigare framkom från teorin var att ha antistatiska material, ha på skyddsglasögon, hjälm och skyddshandskar i närheten av systemet och tydliga avgränsningar till lagringsplatsen. Det som kan tilläggas där är att en bärbar detektor ska också användas i samband med vistelse nära systemet och möjligtvis en värmekamera för att upptäcka bränder. Kan hänvisas i teorin kring vätgas att det är helt osynligt då det brinner.
- Korrekt materialval, vilket reducerar möjligheten för väteförspredning och i sin tur för läckage:
 - Materialet som är planerat är rostfritt stål EN 1,4404 (316L). Det är stålet som används i industrin och är inte lika benägen för väteförspredning. Tätningarnas material kommer att väljas baserat på bilaga 5.

Riskerna är det som också styr skyddsåtgärderna, därför ska en omfattande riskanalys av hela systemet utföras före valet av skyddsåtgärder. Skyddsåtgärderna anpassas utifrån riskernas omfattning i olika utsträckningar.

5.3.3 Räddningsplan

Vid omfattande hantering av farliga explosiva kemikalier ska en intern räddningsplan upprättas. Som också nämndes i teoridelen ska en intern räddningsplan förberedas. Räddningsplanen omfattar förberedelse för olyckor som kan hända och vilka åtgärder som bör tas för att minimera olyckans omfattning samt förberedelse för hur undanröjningen av olyckan och miljön verkställs. Detta ska göras i enlighet med 28§ i, *Lag om säkerhet vid hantering av farliga kemikalier och explosiva varor 390/2005*. (Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390, 2005)

Det som ska framkomma i räddningsplanen är följande:

- Allmänna uppgifter om verksamhetsutövaren.
- Beskrivning av verksamheten.
- En layout över området/byggnaden, redogörelse av alla ritningar så som planritningar, avloppsritningar, samlingsplatser och ankomstrutter.
- Interna räddningsverksamheten, namn och ansvarsområden för grupper och namn på de som kontaktar räddningsmyndigheten.
- Övervakningssystem som brandalarm, detektorer, placeringar och anvisningar till nödmeddelande.
- Släckningssystem, en redogörelse över släckningsutrustningen på området.
- Kommunikation med myndigheten, räddningsmyndigheten och anmälningar.
- Utbildning av personal över räddningsplanen.
- Rövning efter olyckor, förberedande åtgärder för att minimera olyckans konsekvenser.
- Bedömning av olyckornas konsekvenser utanför produktionsanläggningen.

Från tidigare har anläggningen i Vasklot en intern räddningsplan och den ska uppdateras i samband med vätgasprojektet. Den externa räddningsplanen ska också uppdateras. När det gäller explosionsskyddsdokumentet ska den uppdateras för vätgasanvändningen.

Explosionsskyddsdokumentet grundar sig på en redogörelse av explosionsrisker, där visas

det att utrustning kan med säkerhet användas i explosiv atmosfär samt förstås vilka krav som sätts på utrustningen. Explosionsskyddsdocumentet ska göras före arbetet tas i bruk och ska uppdateras om ändringar sker på arbetsplatsen gällande risker med explosioner.

6 Diskussion

Användningen av vätgas är lite unikt i jämförelse med andra bränslen, orsaken är vätets speciella egenskaper. Utmaningen är att försöka få ner processkostnader till en konkurrenskraftigt pris, vilket i dagens läge är betydligt högre än processkostnader för konventionella bränslen, vilket också volympriset reflekterar. Framför allt ska mer vikt på säkerheten läggas, oberoende applikation så finns likadana säkerhetsåtgärder där. Det som man märker tydligt från naturgas är hur mycket komponenter som egentligen behöver bytas ut. Alla aspekter på bränslesystemet ska bedömas om. Det gäller material, riskområden, eliminera tändkällor, läckageövervakning, osv. Syftet med examensarbetet var att redogöra för vilka saker som behöver åtgärdas för att implementera vätgas i ett bränslesystem för naturgas. För att kort sammanfatta det som har presenteras i examensarbetet, så är att största delen av systemet ska bytas ut, läggas till och tänkas om.

Saker som ska bytas ut är:

- Rör (som är i kontakt med vätgasen), tätningar, el-utrustning i riskzoner till högre explosionsklass IIA → IIC.

Läggas till:

- Extern ventilation till potentiella läckageplatser, detektor för identifiering av vätgas i luften, inertsystem för bränslesystemet, kontrollsäkerhetsåtgärder som avstängning av vätgastillförsel och vätgaslagringsplatsen.

Tänkas om:

- Lagringsplatsen med skyddsåtgärder som väggar, övervakningen av brand, läckage och explosion, skyddsåtgärder vid inomhusanvändning med vätgas, avgasningen, byggnadens ventilation och säkerhet.

Delsyftet var att försöka redogöra hur olika mängder vätgas påverkar verksamhetsutövaren. Det visade att för mängder under 100 kg behövs endast en anmälan och därifrån upp till 2000 kg krävs tillstånd från Tukes. Här ska beaktas tidigare lagrade bränslen, med hjälp av ekvation 1 så kan relationstalet för olika bränslen summeras ihop blir svaret över 1 innebär det att omfattande industriell hantering utförs och tillstånd ska sökas av Tukes. Konkret

betyder det om verksamhetsutövaren lagrar andra bränslen nära relationstalet 1 kan det räcka med en ökning på några tiotals kilo vätgas så svänger omfattningen av hanteringen. Det ska beaktas ifall vätgas ska lagras på fastigheten, också i mindre mängder.

Hur ser en bra och säker designad motorcell ut för vätgas?

- Avgränsad verksamhet från kontorsutrymmen.
- Stora användningsvolymmer i motorcellen och högt till tak.
- Ett bra övervakningssystem med detektorer och brandalarm.
- Avsaknaden av antändningskällor i riskområden.
- Bra luftomväxling, med koncentrerad ventilation till potentiella läckageställen.
- Personalen är utbildad i användningen av vätgas och känner till farorna.
- Säkerhetsutrustning är lättillgänglig och personalen använder personlig säkerhetsutrustning vid lagringsplatsen och motorcellen under drift.
- Kontroll av motor och bränsletillförsel vid detektion av vätgas i luften.

Det som också gav bra insikt i det här var intervjuer med experter inom området. Deras resonemang, deras erfarenhet sätter verkligen bra riktlinjer för hur ett liknande hanteringssystem ska se ut. Där framkom också mycket ny information som var helt obekant men viktiga saker och möjligheten att fråga specifika frågor exakt lämpat för Vasklot anläggningen och specifikt motorcellen. Fick en ganska bra bild av vilka åtgärder som krävs för att implementera vätgas i ett bränslesystem. Där var också Tukes väldigt hjälpsam både från nätsidorna och genom att svara på direkta frågor.

6.1 Problemområden

Det finns utmaningar med att både hantera och lagra väte, alltså både vätgas och flytande väte. Det som gör bränslet vätgas utmanande är återigen dess speciella egenskaper, den låga volymdensiteten, reaktiviteten, låga antändningsenergin, breda antändningsområdet och diffusiviteten. Det sätter mer krav på material, utrustning, säkerhet, användning, personal och verksamheten i jämförelse med naturgasanvändningen. Ett problemområde är att det inte finns liknande projekt dokumenterade, utan det blir att ta mindre lösningar från andra

applikationer. Där är svar från intervjuerna väldigt hjälpsamma, som baserar sig på erfarenhet. En utmaning är också att situationen i Vasklot inte är optimal och flexibelt när det gäller att testa och ta in nya bränslen, därav kunde en avlägsen plats vara bättre lämpad för bland annat tillståndsansökningen och snabbare ta fram testresultat. Nu så krävs en hel del omändringar och ansökningar i en redan trång industrifastighet på ett hamnområde, vilket minst sagt är mer utmanande än på en mer avlägsen plats. Slutligen kan man också påstå att med den mängd vätgas som nu kommer att användas skulle en anmälan räckt ifall användningen skulle ha skett någon annanstans och enbart vätgaslagring.

För att tillägga så är heller inte motorcellen och den här installationen en nybyggnation. Situation och åtgärderna kunde möjligtvis ha sett annorlunda ut vid en nybyggnation än situationen i Vasklot. Redan med det finns det flera begränsningar som ska beaktas.

6.2 Vidareutveckling

Framtiden ser ljusare ut för vätgas som bränsle i olika applikationer. Som tidigare nämnt så fortsätter projektet med att testa ren vätgas i en testmotor. Sommaren 2021 är inplanerad som första start av motorn och före det ska givetvis allt förberedas och installeras. Utvecklingen fortsätter med att testa motorn och förstås det kringliggande system som har redogjorts i det här examensarbetet. En bättre helhetsbild av hur motorcellens omställning ser ut och de faktiska förändringarna kunde också redogöras. Varefter finns det säkert mycket utvecklingspotential i förbränningstekniken väl då testningen har påbörjats. En annan sak som jag själv inte vill se stor utvecklingspotential är i säkerheten, den bör prioriteras högt redan från början. Men och andra sidan finns det säkert mycket mer kostnadseffektiva säkerhetslösningar att utvecklas. Kostnaden ska också tas tillbeaktande, kostnaden är en stor avgörande faktor i framtiden för att implementera vätgassystem i t.ex. kraftverk eller fartygsindustrin.

7 Avslutning

Till sist en mer personlig övergripande avslutning över examenarbetet och projektet. I skrivande stund så fortsätter projektet medan examenarbetet avslutas. Det har varit en mycket lärorik period att få vara delaktig i projektet och minsann att få möjligheten att bidra och lära sig hur projekt hanteras i industrin. Det ger en mycket djupare perspektiv då studierna och arbetsmiljön kombineras, vilket jag tycker var otroligt intressant då båda världarna möts.

Det som har gjort genomförandet av examensarbetet utmanande var den rådande världspandemin, vilket begränsade rörligheten avsevärt. Det betyder att inga extra människor ska vistas på arbetsplatserna vilket också berörde mig. Därför var situationen kanske mer krävande från en personlig synvinkel. Men oavsett var det mycket lärorikt fastän situationen var som den var, tacksam för möjligheten att utföra mitt examenarbete vid Wärtsilä och för alla kollegor som hjälp till och handledningen av bägge handledare.

8 Källförteckning

- AISBL, E. I. (2014). *HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS*. Hämtat från eiga:
<https://www.eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2532&token=17b3cf7479e0b3ebf9a602a522c7be5b25aa5f22>
- Atomfysik*. (den 22 3 2021). Hämtat från <http://www.nordlov.se/atom/atom.htm>
- Berg, H. (2015). *Blandning av väte i naturgas för gasmotorer*. Vasa: Wärtsilä.
- Bjerketvedt, D., Bakke, J., & Wingerden, K. v. (1997). *Gas Explosion Handbook*.
- Campi, G., & Karagianni, S. (den 1 Oktober 2020). *The H2 handbook*. Hämtat från K&L GATES: www.klgates.com/epubs/h2-handbook/index.html#
- Cao, M., & Krishnamurthy, R. (2009). *HYDROGEN FUEL, Hydrogen transmission in pipelines and storage in pressurized and cryogenic tanks*. CRC Press.
- EN15399. (u.d.). Gas infrastructure.Safety management system with maximum operating pressure up to 16 bar.
- Energy, U. D. (u.d.). *Hydrogen Tools*. Hämtat från h2Tools:
<https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>
- GATES, K. (October 2020). Hämtat från The H2 Handbook.
- Grahl, J. D. (2021). *Ri*. Hämtat från <https://www.ri.se/sv/vad-vigor/expertiser/dammexplosioner>
- HydrogenEurope. (April 2019). *Hydrogen Europe Vision on the Role of Hydrogen and Gas*. Hämtat från hydrogenEurope:
https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/hydrogen_europe_-_vision_on_the_role_of_hydrogen_and_gas_infrastructure.pdf
- International energy agency*. (2018). Hämtat från World energy balances: Overview:
<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>
- Kemikaalivirasto, T. j. (2015). *Vaarallisten kemikaalien varastointi*. Tukes.
- Lag om säkerhet vid farliga kemikalier och explosiva varor 3.6.2005/390*. (2005). Hämtat från www.finlex.fi
- Marco rubber and plastic*. (u.d.). Hämtat från O-Ring Chemical Compatibility Chart:
<https://www.marcorubber.com/o-ring-chemical-compatibility-chart.htm#null=&chemId=1051>
- McCoy, L. (2020). What role can hydrogen play on the path to a 100% renewable energy future? *Wärtsilä*, 1.
- NASA. (1997). *Safety standard for hydrogen and hydrogen systems*.
- Nominal pipe size*. (2021). Hämtat från Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Nominal_Pipe_Size
- Pant, K., & Gupta, R. B. (2009). *HYDROGEN FUEL, Fundamentals and use of hydrogen as fuel*. CRC Press.

- Ppminindustrial. (2020). Hämtat från <https://www.ppmindustrial.com/om-gas/ordlista-och-lathundar/>
- Rigas, F., & Sklavounos, S. (2009). Hydrogen Safety. i *Hydrogen Fuel* (ss. 536-566).
- Räddningslag 29.4.2011/379. (2011). Hämtat från www.finlex.fi
- Satyapal, S. (den 21 Februari 2017). *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. Hämtat från Hydrogen: A Clean, Flexible Energy Carrier: <https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier>
- SFS. (2012). *SFS käsikirja 59*.
- Speight, J. D. (2007). *Hydrogen as a future energy carrier: Hydrogen as a fuel*. WILEY-VCH GmbH&Co.
- Statsrådets förordning av fara som explosiv atmosfär orskar arbetstagare 576/2003. (2003). Hämtat från www.finlex.fi
- Statsrådets förordning om övervakning och upplagring av farliga kemikalier 21.5.2015/685. (2015). Hämtat från www.finlex.fi
- Tukes. (2021). *Ansökan om byggnadstillstånd*. Hämtat från <https://tukes.fi/sv/industri/naturgas-och-biogas/ansokan-om-byggnadstillstand-och-anmalningar>
- Tukes. (2021). *Utrustning i explosionsfarliga omgivningar - ATEX*. Hämtat från <https://tukes.fi/sv/industri/explosionsfarliga-omgivningar/utrustning-i-explosionsfarliga-omgivningar-atex>
- Tukes. (u.d.). *Byggnadstillstånd för bio-och naturgas*. Hämtat från <https://tukes.fi/sv/industri/naturgas-och-biogas>
- Tukes. (u.d.). *Explosionsfarliga omgivningar*. Hämtat från <https://tukes.fi/sv/industri/explosionsfarliga-omgivningar>
- Venetsanos, A. (2008). *HySafe*. Hämtat från Biennial Report on Hydrogen Safety, chapter 3 hydrogen dispersion.
- Wärtsilä. (2001). *Projektsuunnitelma: Vetymoottoriprojekti*.
- Wärtsilä. (den 30 3 2021). Hämtat från Wärtsilä: <https://www.wartsila.com/>
- Zuttel, A. (den 17 Mars 2004). *Researchgate*. Hämtat från Hydrogen storage methods: https://www.researchgate.net/publication/8618603_Hydrogen_storage_methods#pf4

Bilaga 1 Tabell över kompatibla material för väte (NASA, 1997).

Table A5.1
Summary of Material Compatibility for Hydrogen Service

Material	Service			Remarks
	GH ₂	LH ₂	SLH ₂	
Aluminum and its alloys	Yes	Yes	Yes	
Austenitic stainless steels with > 7% nickel (such as, 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	Yes	Yes	Yes	Some make martensitic conversion if stressed above yield point at low temperature.
Carbon steels	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Copper and its alloys (such as, brass, bronze, and copper-nickel)	Yes	Yes	Yes	
Gray, ductile, or cast iron	No	No	No	Not permitted for hydrogen service.
Low-alloy steels	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Nickel and its alloys (such as, Inconel [®] and Monel [®])	No	Yes	Yes	Susceptible to hydrogen embrittlement
Nickel steels (such as, 2.25, 3.5, 5, and 9 % Ni)	No	No	No	Ductility lost at LH ₂ and SLH ₂ temperatures.
Titanium and its alloys	Yes	Yes	Yes	
Asbestos impregnated with Teflon [®]	Yes	Yes	Yes	Avoid use because of carcinogenic hazard.
Chloroprene rubber (Neoprene [®])	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Dacron [®]	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Fluorocarbon rubber (Viton [®])	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Mylar [®]	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Nitrile (Buna-N [®])	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Polyamides (Nylon [®])	Yes	No	No	Too brittle for cryogenic service.
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F [®])	Yes	Yes	Yes	
Polytetrafluoroethylene (Teflon [®])	Yes	Yes	Yes	

Intervjuanteckningar

Intervju med en sakkunnig inom området, väte som bränsle och installation.

Projektet började med att Norges vägväsende ville bygga första vätedrivna fartyget, Wärtsilä gjorde ett koncept för två färjor. Ena färjan skulle gå på el och andra med väte. Fartyget kördes med flytande väte för att ha högre energidensitet och så var det favoriserat med flytande väte, men det var mycket mer krävande och kostsamt. Definitivt skulle det ha varit enklare att använda i gasform. Rederiet boreal är bolaget som kör med fartygen, systemet är godkänt av DNV-GL och sjöfarten i Norge. Fartyget är då också flaggad i Norge.

De kritiska säkerhetsaspekterna var stora läckage av väte och explosion. I det här fallet så ventilerades också tanken och för ventilation krävs några större dimensioner än i jämförelse med LNG tankar. Totala mängden väte var ca 38200 kg och ett tankryck på 6 bar.

Läckage är svårt att förhindra fast hur täta skarv och rör som används. Oavsett finns det alltid mindre eller större mängd läckage. Från TCS och förångningsaggregatet fanns ett ventilationsrör som gick ända upp som en mast över båtens hytt. Därtill var den utrustad med separat ventilationsrör till tanken. För att säkerställa att ingen explosion sker kan tankrummet fyllas med kväve för att få ner syrehalten. Ombord fanns trycksatta nitrogen tankar för att inerta de ställen där explosionsrisken var som störst. Rummet trycksattes då för att hålla konstant övertryck.

Bränslecellens del var också trycksatt med kväve med egen ventilation. Alternativt är att ha bra luftväxling i boxen eller rummet istället för att inerta med kväve. Rören som används är dubbla rör med ventilation, i mellanväggen används kväve också, alltså utanför Ex zonen tillämpades dubbla rörs konfigurationen.

Det var kontinuerlig inmatning av kväve i alla inkapslingar och samtidigt luftväxling med ventilation, meningen är att ersätta omgivningen med syre ifall läckage av väte förekommer bildas ingen explosiv atmosfär.

Hur vet man var det potentiellt kommer att läcka? Leverantören av alla olika komponenter som tryckreglering och ventiler så kan ge svar på var det läcker, i alla fall leverantörerna i Norge.

Ventilarrangemanget behöver man säkra med ventilering. Gjutna material användes inte vad han Terje vet av och han kunde inte ge svar på om det kan användas i vätesystem. Bränsletankens material var 304L.

För riskanalys tillämpades IGF-Del A koden och alternativ design, den är ämnad för LNG fartyg främst. Hazid analys gjordes för alla olika scenarier för läckage och risker. MSC.1/Circ. 1455 guidelines for the approval of alternative and equivalent as provided for in various IMO instruments tillämpades vid säkerhets designen och klassificeringen av hela fartyget. Standarder som användes var:

- IGC International code for the construction and equipment of ships carrying liquified gases in bulk
- IGF international code of safety for ships using gases or other low flashpoint fuels.

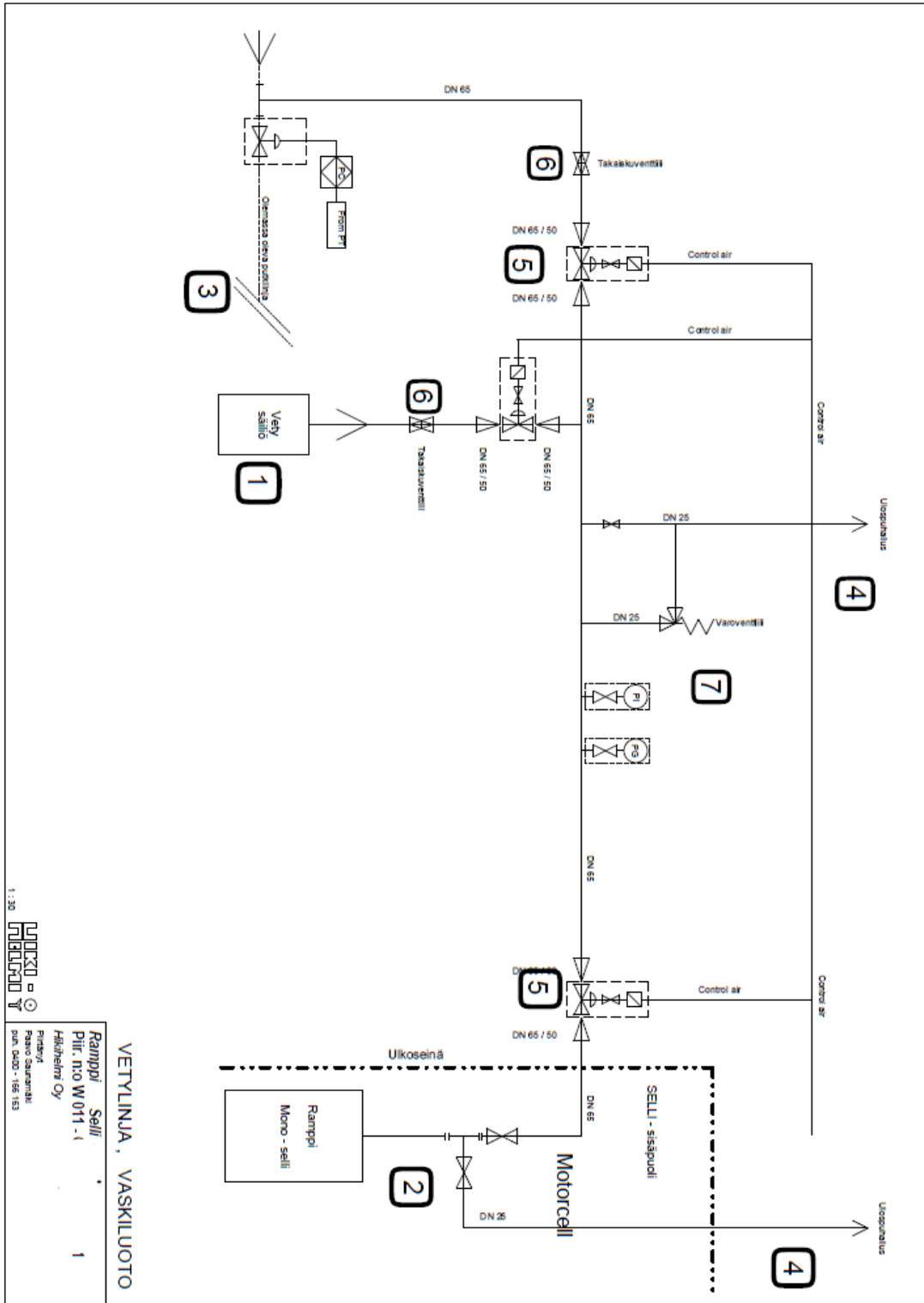
Säkerhetssystemet som mäter halten av hydrogen placerades i tankrummet och utöver det också en sensor som mäter syrehalten. Då vet man både väte och syrekoncentration i tankrummet.

DNV var väldigt fokuserade på flytnade väte, explosionsrisken i TCS och potentiella väte läckaget.

Hur vet man att kväve är närvarande i dubbelrörs konfigurationen?

Det finns olika metoder man kan t.ex. med flödesmätning och vätesensor eller med tryckövervakning som ser om trycket ökar och sjunker i bågge delar av röret.

För just flytande väte är påfyllningen en stor säkerhetsrisk, syre kan kondensera och kan bli som dynamit. För att eliminera det behövs purging av påfyllningsröret med kväve eller med väte i gasform.



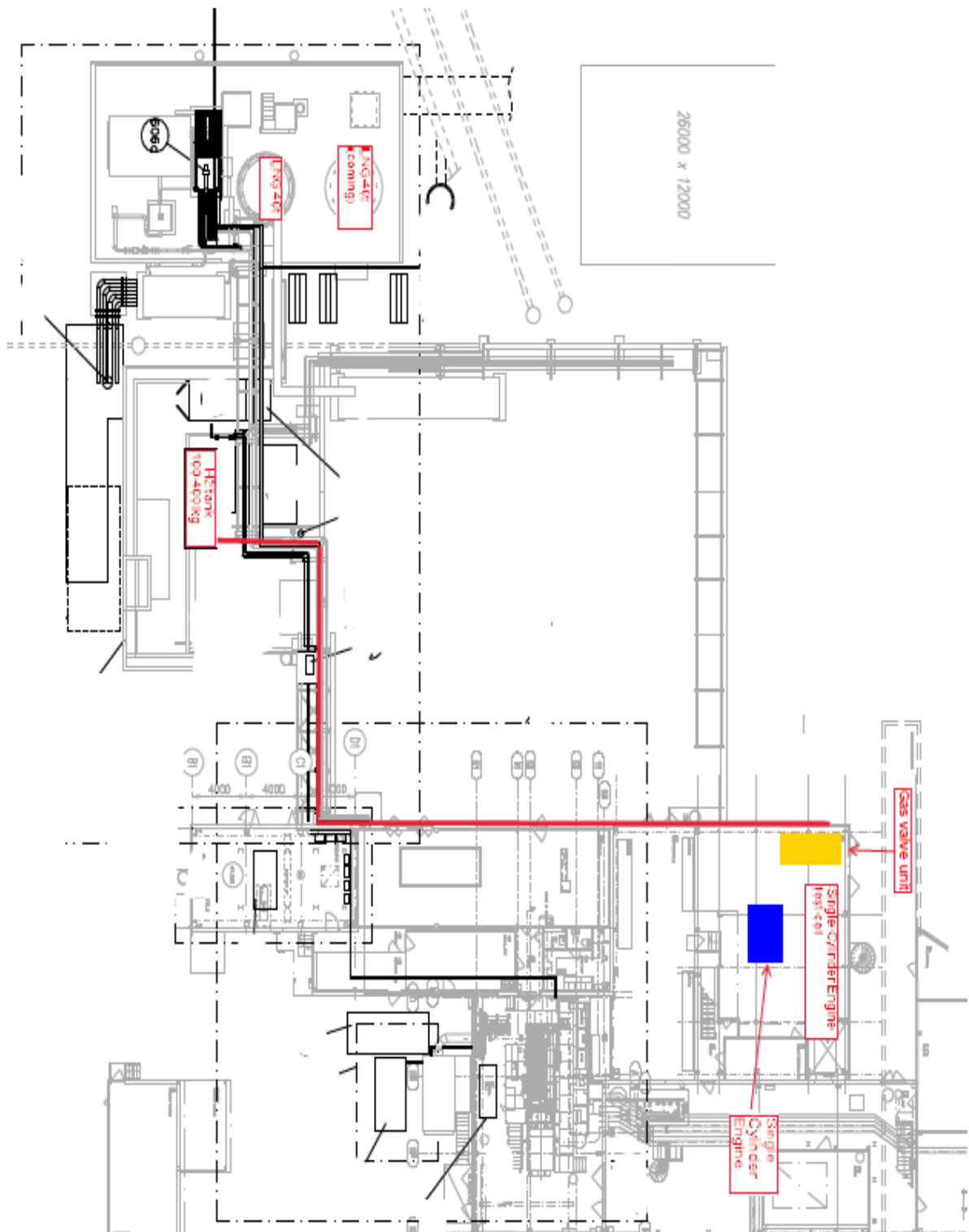
1:30

VETYLINJA, VASKILUOTO

Ramppi Selli
 Piiri: nro W 011 -
 Hakkilinen Oy
 Puh. 0400 - 156 153

1

Bilaga 4



Tillståndsansökan för omfattande hantering av farliga kemikalier

För att få lov att lagra och hantera vätgas krävs myndigheternas tillåtelse från säkerhets- och kemikaliverket Tukcs. En tillståndsansökan för omfattande hantering och upplagring av farliga kemikalier ska lämnas in som behandlar:

- Allmän information om företaget, namn, ansvariga personer, hemort osv
- Beskrivning och planering av hur hanteringen och lagringen ser ut och vilka kemikalier det handlar om samt vid behov schematisk skiss
- Beskrivning av farliga ämnen, i det här fallet alla bränslen vid lagringsplatsen
- Beskrivning av vilka olyckor som orsakas av hanteringen av de farliga kemikalierna, samt hur riskerna och olyckorna identifieras
- Placering av anläggning, karta, redogörelse för omständigheter som trafik, byggprojekt som har något att göra med anläggningens lokalisering
- Identifiera de risker som kan förekomma vid tekniska genomförandet och generella principer för genomförandet

Enligt statsrådets förordning om övervakning av hanteringen och upplagringen av farliga kemikalier 685/2015 bilaga II.



O-RINGS AND GASKETS

https://www.efunda.com/designstandards/onna/oring_chemical.cfm?SM=nono&SC=Hydrogen%20Gas

<https://www.marcrubber.com/o-ring-chemical-compatibility-chart.htm>

O-Ring Compatibility

Category: O-Ring Material

O-Ring Materials Compatible with Hydrogen Gas
(Select a material to view its compatible chemicals)

Dure-N (Nitrile) (4)	Buyl (4)	Chromoc (4)
Diphenyl Propylene (1)	Fluorocarbon (4)	Hyptalon (4)
Neoprene (1)	Polyacrylate, Milled (1)	Isolon, Virgin (1)
Nasene (4)	Natural Rubber (1)	Polysulfide (1)
Styrene Butadiene (1)	Fluorocarbon (2)	Silicone (2)
Atlas (1)	Epichlorohydrin (1)	Kalrez (1)
Nitrile, Hydrogenated (1)	Polysulfide (1)	Polyurethane, Cast (1)

Legend: ● Excellent (90% Seal) ● Good (75% Seal) ● Fair (50% Seal) ● Not Recommended ● Excellent (90% Seal) ● Good (75% Seal) ● Fair (50% Seal) ● Not Recommended

HYDROGEN GAS				HYDROGEN GAS, HOT			
Material	Rating	Cost	Use (1/10)	Material	Rating	Cost	Use (1/10)
Polyacrylonitrile	FFKM	\$\$\$\$	100%	Polyacrylonitrile	FFKM	\$\$\$\$	100%
Nitrile Extreme	ETP	\$\$\$\$	100%	Nitrile Extreme	ETP	\$\$\$\$	100%
Nitrile Type A	FKM	\$\$\$	100%	Nitrile Type A	FKM	\$\$\$	100%
Nitrile, Buna-N	NBR	\$	100%	Nitrile, Buna-N	NBR	\$	100%
Hydrogenated Nitrile	HNR	\$	100%	Hydrogenated Nitrile	HNR	\$	100%
Diphenyl Propylene	QDM	\$	100%	Diphenyl Propylene	QDM	\$	100%
Atlas	TFEP	\$\$\$\$	100%	Atlas	TFEP	\$\$\$\$	100%
Silicone	VMQ	\$	100%	Silicone	VMQ	\$	100%
Fluorocarbon	FVMQ	\$\$\$	100%	Fluorocarbon	FVMQ	\$\$\$	100%
Buyl	IR	\$	100%	Buyl	IR	\$	100%
Neoprene	CR	\$	100%	Neoprene	CR	\$	100%
Isolon	AI	\$\$\$	100%	Isolon	AI	\$\$\$	100%
Teflon	PTFE	\$\$\$	100%	Teflon	PTFE	\$\$\$	100%
Styrene Butadiene	SBR	\$	100%	Styrene Butadiene	SBR	\$	100%
Natural Rubber	NR	\$	100%	Natural Rubber	NR	\$	100%
Acrylic Rubber	ACM	\$\$\$	100%	Acrylic Rubber	ACM	\$\$\$	100%
Diphenyl Acrylic	ADM	\$\$\$	100%	Diphenyl Acrylic	ADM	\$\$\$	100%

Table 3. Summary of material compatibility for hydrogen service (NASA, 1997)

Material	Service		Remarks
	Gas H2	Liquid H2	
Aluminum and its alloys	Yes	Yes	
Austenitic stainless steels with >7% nickel (SAE 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	Yes	Yes	Some make martensitic conversion if stressed above yield point at low temperature
Carbon steels	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Copper and its alloys (brass, bronze and copper-nickel)	Yes	Yes	
Gray, ductile or cast iron	No	No	Not permitted for hydrogen service
Low-alloy steels	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Nickel and its alloys (Inconel, Monel)	No	Yes	Susceptible to hydrogen embrittlement
Nickel steels (2.25, 3.5, 5 and 9% Ni)	No	No	Ductility loss at liquid H2 temperatures
Titanium and its alloys	Yes	Yes	
Chloroprene rubber (Neoprene)	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Diacron	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Fluorocarbon rubber (Viton)	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Mylar	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Nitrile (Buna-N)	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Polyamides (Nylon)	Yes	No	Too brittle for cryogenic service
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F)	Yes	Yes	
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	Yes	Yes	

Table 11. Comparison of different sealants [1]: ACEseals, [2]: MatWeb, [3]: Alberding, [4]: Eclipse engineering Inc., [5]: Green Tweed, [6]: San Marchi, C., 2008, [7]: Parker.

Material	Hardness (Shore A)	Temperature range	Elongation @ break	Permeability (cm ³ cc ⁻¹ s ⁻¹ in ²)	Performance
Nitrile (NBR)	70 [1]	-40-130 [1]	~300% [1]	1.45, @ 293 K 12.1, @ 353 K [4]	(++) Oil resistance (+) Wear resistance [1] (Suggested by NASA)
Viton (FKM)	70 [1]	-30-200 [1]	~220% [2]	1.21, @ 293 K 18.6, @ 353 K [4]	(++) Oil resistance (+) Wear resistance [1] (Suggested by NASA)
Polyurethane	70-90 [1]	-50-100 [1]	~900% [1]	21.2, @ 312 K [7]	(+) Oil resistance (++) Wear resistance [1]
Teflon (PTFE)	55 Shore D [4]	-200-200 [4]		3.5, @ 298 K [4]	(++) Temperature range (++) Corrosion resistance (-) Sealant (-) Inheritor [4] (Suggested by NASA)
Neoprene	40-90 [1]	-43-107 [1]	400% [1]	4.55, @ 298 K 9.24, @ 368 K [4]	(++) Oil resistance (+) Wear resistance [1]
Silicone	30-40 [1]	-60-230 [1]		100, @ 293 260, @ 390 [4]	(+) Oil resistance (-) Petroleum [1]
FFKM	65-85 [5]	-40-325 [1]	100-300% [5]		(++) Wear resistance (++) Oil resistance (++) Temperature range [5]