

# Samband mellan skyddsnivå och risknivå för en vätgastankstation baserat på kvantitativ riskanalys

---

OSCAR FREDRIKSSON

BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET



# **EXAMENSARBETE**

## **Brandteknik**

**Samband mellan skyddsnivå och risknivå för en  
vätgastankstation baserat på kvantitativ riskanalys**

**Oscar Fredriksson**

**Lund 2023**

|  |   |
|--|---|
| <b>Title:</b>  | Relation between level of safety and level of risk for a hydrogen fueling station based on a QRA.   |
| <b>Titel:</b>  | Samband mellan skyddsnivå och risknivå för en vätgastankstation baserat på kvantitativ riskanalys.  |
| <b>Authors:</b>  | Oscar Fredriksson<br>os1238fr-s@student.lu.se   |
| <b>Report 5691</b><br><b>ISRN: LUTVDG/TVBB--5691--SE</b> |   |
| <b>Number of pages:</b>                                  | 56  |
| <b>Illustrations:</b>                                    | If not specified, all illustrations belong to the author.   |
| <b>Keywords:</b>   | Hydrogen fueling station, QRA, HyRAM+, AIR, FAR, SIL  |
| <b>Sökord:</b>   | Risk, vätgas, vätgastankstation, jetflamma, individrisk, felträd, händelseträd, H <sub>2</sub> -TSA   |
| <b>Abstract</b>  | Currently, there are no given directives and regulations on how hydrogen refueling stations should be designed in Sweden. A proposal regarding hydrogen refueling stations H <sub>2</sub> -TSA, is being developed by Energigas Sverige and is expected to be published in 2023. The aim of this thesis is to contribute to development and future revisions of H <sub>2</sub> -TSA. It is done by analyze how a general hydrogen refueling stations is affected by adding or removing safety systems. Scenarios are based on the FMEA method and an overall description of the system. The results are based on a QRA and consequence simulations calculated in HyRAM+. Risks are quantified for each scenario and are then compared by relative risks. The conclusion indicates that the quantity of partition has a great impact on the level of risk. An increased variety of walls lowered the risk and a decreased variety of walls resulted in a major risk. |

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023  
Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

|  |   |
|--|---|
| Brandteknik<br>Lunds Tekniska Högskola<br>Lunds universitet<br>Box 118<br>221 00 Lund<br><br>Sverige<br><br>www.brand.lth.se<br>Telefon: 046 - 222 73 60 | Division of Fire Safety Engineering<br>Faculty of Engineering<br>Lund University<br>P.O. Box 118<br>SE-221 00 Lund<br><br>Sweden<br><br>www.brand.lth.se<br>Telephone: +46 46 222 73 60 |
|--|---|



# Förord

Denna rapport utgör den avslutande delen i utbildningen till brandingenjör samt civilingenjör i riskhantering på Lunds Tekniska Högskola, LTH. Under arbetets gång har ett antal personer hjälpt till och stöttat i projektet. Jag skulle vilja ta tillfället i akt och rikta ett extra stort tack till följande personer:

**Marcus Runefors**, som varit handledare och som guidat mig genom projektet. Tack för ditt engagemang och intresse för detta arbete. Tack för att du delat med dig av din kunskap och varit stöttande under hela arbetet.

**Erik Sparre**, för din tid och engagemang som extern handledare. Utan dig och din kompetens hade inte arbetet blivit det samma.

**Riskpilot**, för möjligheten att arbeta med examensarbetet på kontoret i Malmö. Tack för ni fått mig att känna mig välkommen och som en del av teamet. Men även för möjligheten att få träffa och lära mig av era fantastiska kollegor.

**Brandkonsultbyrån Sverige AB**, för möjligheten att arbeta med examensarbetet på kontoret i Hässleholm samt alla kloka idéer och glada tillrop jag fått från kollegorna.

# Förkortningar

|              |   |
|--------------|---|
| <b>AFS</b>   | Arbetsmiljöverkets författarsamling         |
| <b>AIR</b>   | Average Individual Risk                     |
| <b>ALARP</b> | As Low As Reasonably Practicable            |
| <b>CNG</b>   | Compressed Natural Gas                      |
| <b>FAR</b>   | Fatal Accident Rate                         |
| <b>FMEA</b>  | Failure Mode and Effect Analysis            |
| <b>FTA</b>   | Felträdsanalys                              |
| <b>HAZOP</b> | Hazard and Operability Study                |
| <b>HIAD</b>  | Hydrogen Incident and Accident Database     |
| <b>LFL</b>   | Lower Flamability Level                     |
| <b>LNG</b>   | Liquefied Natural Gas                       |
| <b>MSB</b>   | Myndigheten för samhällsskydd och beredskap |
| <b>MTTR</b>  | Mean Time To Repair                         |
| <b>PED</b>   | Pressure Equipment Directive                |
| <b>PLL</b>   | Potential Loss of Life                      |
| <b>SIL</b>   | Safety Integrity Level                      |
| <b>UFL</b>   | Upper Flamability Level                     |

# Ordlista

För att underlätta för läsaren presenteras nedan definitioner av nyckelbegrepp som använts i rapporten.

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <i>ATEX-direktivet</i>        | Direktiv som innehåller föreskrifter för hantering av brandfarliga gaser och vätskor samt riskreducerande åtgärder för explosiv atmosfär.  |
| <i>Dispenser</i>              | Den utrustning man tankar sitt fordon med, motsvarande mätarskåp på en bensinstation (MSB, 2015, s. 24).   |
| <i>Felmod</i>                 | Det sätt på vilket det kritiska objektet kan fela.   |
| <i>Diffusivitet</i>           | Värmeledningsförmåga per densitet och specifik värmekapacitet.   |
| <i>Logisk grind</i>           | Relationen mellan händelserna i ett fel- eller händelsetråd.   |
| <i>Risk och riskhantering</i> | <p>Risk refers to the uncertainty about and the severity of the events and consequences (or outcomes) of an activity with respect to something that humans value (Tehler, 2020, s. 76).</p> <p>The activities performed to managed risk. The purpose of these activities is to achieve purposeful protection of what is deemed valuable (Tehler, 2020, s. 76).</p> |
| <i>Sannolikhet</i>            | Storhet som anger hur troligt det är att en händelse inträffar (Terminologacentrum TNC, 2012)  |
| <i>Felfrekvens</i>            | Förväntat värde på antalet händelser över en konstant tid (LLoyd's Register Consulting, u. å., s. 4).  |
| <i>Intensitet</i>             | Beräknade förväntade antalet händelser per tidsenhet för en tidsberoende analys (LLoyd's Register Consulting, u. å., s. 4).  |





# Summary

The purpose of this thesis is to investigate how the level of risk changes when protective measures are added to or removed from a typical facility for a hydrogen refueling station. The results demonstrate that the amount of physical separation is the most significant barrier. The implementation of physical separation is directly linked to the level of safety, which contributes to the system's level of risk. In addition to physical separation, the pressure of hydrogen gas also affects the level of risk. Halving the gas pressure results in a reduced risk relative to the base design.

With an increasing demand of hydrogen, updated and developed regulations and requirements are necessary to maintain a high level of safety. This work is based on a draft of the future consultation proposal regarding hydrogen refueling stations. The proposal H<sub>2</sub>-TSA is being developed by Energigas Sverige and is expected to be published in 2023. The aim of this thesis is to contribute to development and future revisions of H<sub>2</sub>-TSA. Currently, there are no given directives and regulations on how refueling stations should be designed in Sweden. Requirements are imposed through other regulations and standards, such as ATEX.

Hydrogen fueling stations are designed differently depending on the manufacturer and country. Therefore, this thesis begins by describing a representative typical facility that lays the foundations for the analysis. The typical facility is designed based on existing refueling stations and the draft of H<sub>2</sub>-TSA that the author has access to. The analysis is limited to not delving into how hydrogen is produced and assumes that hydrogen is available on site. The system consists of four main components: tank, compressor, buffer, and dispenser. The design and layout vary between different suppliers, but the main components are the same. The stored hydrogen is compressed via the compressor to a pressure that corresponds to the final delivery pressure of 350 or 700 bars depending on the type of vehicle and refueling process. After the gas is compressed, it is stored in a buffer until a vehicle is refueled through the dispenser. Heavier vehicles such as trucks and buses can be refueled at a lower pressure than passenger cars.

The components within the system are analyzed through a Failure Mode and Effective Analysis (FMEA). The method describes the components and their failure modes, and further analyses whether the failure mode pose a safety problem. Based on the results of the FMEA and identified deficiencies in the system description, a baseline and design variations of the typical facility are defined. The baseline and design variations of the system are modelled and calculated in the consequence calculations program HyRAM+. The calculations result in individual risks for the different scenarios, which are then compared to the baseline through relative risks. In addition to calculations of individual risks, a fire safety analysis is also conducted, where flame lengths are analyzed based on size of leakages and gas pressure. Calculations are performed using the HyRAM+ model.



# Sammanfattning

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur risknivån förändras när man lägger till eller tar bort skydd i en typanläggning för en vätgastankstation. Resultatet visar att mängden fysisk avskiljning är den mest betydelsefulla barriären. Hur fysisk avskiljning implementeras är direkt kopplad till säkerhetsnivån som bidrar till systemets risknivå. Utöver fysisk avskiljning så har vätgasens tryck påverkan på risknivån. Ett halverat tryck på gasen resulterar i en reducerad risk relativt grundläget.

Med en ökad efterfrågan av vätgas krävs uppdaterade och utvecklade föreskrifter och krav för att upprätthålla en hög säkerhetsnivå. Detta arbete grundar sig i ett utkast till det framtida remissförslag gällande vätgastankstationer. Remissförslaget H<sub>2</sub>-TSA utvecklas av Energigas Sverige och förväntas publiceras under 2023. Detta examensarbete har som mål att vara en del av utvecklingen och bidra till framtida revideringar av H<sub>2</sub>-TSA. I dagsläget finns inga givna direktiv och föreskrifter hur tankstationer ska utformas i Sverige. Krav ställs genom andra regelverk och standarder, exempelvis ATEX-direktivet.

Vätgastankstationer är utformade och designade olika beroende på fabrikat och land. Detta examensarbete inleds därför med att beskriva en representativ typanläggning som lägger grund för analysen. Typanläggningen designas utifrån befintliga tankstationer samt de utkast av H<sub>2</sub>-TSA som författaren tagit del av. Analysen avgränsar sig från att fördjupa sig i hur vätgas produceras och förutsätter att vätgas finns tillgänglig på plats. Systemet består av fyra huvudkomponenter, tank, kompressor, buffert och dispenser. Utformning och design skiljer sig åt mellan olika leverantörer men huvudkomponenterna är det samma. Den lagrade vätgasen komprimeras via kompressorn till ett tryck som motsvarar det slutgiltiga leverenstrycken på 350 bars respektive 700 bars tryck beroende på typ av fordon och tankningsprocess. Efter att gasen komprimeras lagras den i en buffert tills ett fordon tankas via dispensern. Tyngre fordon som exempelvis lastbilar och bussar kan tankas på ett lägre tryck jämfört med personbilar.

Komponenter inom systemet analyseras genom en FMEA. I modellen beskrivs de ingående komponenterna och deras felmod, vidare analyseras om felmoden utgör ett säkerhetsproblem. Utifrån resultatet av FMEA:n samt identifierade brister i systembeskrivningen definieras ett grundläge samt designvariationer av typanläggningen. Grundläget och designvariationer av systemet modelleras och beräknas i konsekvensberäkningsprogrammet HyRAM+. Beräkningarna resulterar i individrisker för de olika scenarierna som sedan jämförs mot grundläget genom relativa risker. Utöver beräkningar av individrisker utförs även en brandteknisk analys där flamlängder analyseras utifrån håldiameter på läckage och tryck på gasen. Beräkningar görs även genom modellen HyRAM+.



# Innehållsförteckning

|     |                                    |    |
|-----|------------------------------------|----|
| 1   | Inledning.....                     | 1  |
| 1.1 | Bakgrund .....                     | 1  |
| 1.2 | H <sub>2</sub> -TSA.....           | 2  |
| 1.3 | Syfte.....                         | 2  |
| 1.4 | Mål.....                           | 2  |
| 1.5 | Problemformuleringar.....          | 2  |
| 1.6 | Begränsningar.....                 | 2  |
| 1.7 | Avgränsningar.....                 | 2  |
| 2   | Teoretisk bakgrund.....            | 3  |
| 2.1 | Vätgas .....                       | 3  |
| 2.2 | Modeller .....                     | 6  |
| 3   | Metod .....                        | 9  |
| 3.1 | Metodöversikt .....                | 9  |
| 3.2 | HyRAM+ .....                       | 9  |
| 4   | Systembeskrivning.....             | 17 |
| 4.1 | Systemets uppgift.....             | 17 |
| 4.2 | Konstruktionsförutsättningar ..... | 17 |
| 4.3 | Systemets utformning .....         | 19 |
| 4.4 | Antaganden för systemet.....       | 24 |
| 4.5 | Systemets driftlägen.....          | 25 |
| 5   | QRA.....                           | 27 |
| 5.1 | FMEA .....                         | 27 |
| 5.2 | Systemdesign i HyRAM+ .....        | 28 |
| 5.3 | Designvariationer .....            | 30 |
| 6   | Fysikaliska samband .....          | 35 |
| 7   | Resultat.....                      | 37 |
| 7.1 | Resultat QRA.....                  | 37 |
| 7.2 | Resultat fysikaliska samband.....  | 37 |
| 8   | Analys och diskussion .....        | 43 |
| 8.1 | QRA.....                           | 43 |
| 8.2 | Brandteknisk diskussion .....      | 46 |
| 8.3 | Övriga felkällor .....             | 47 |
| 9   | Avslutande diskussion .....        | 49 |
| 9.1 | Metodval .....                     | 49 |

|          |   |      |
|----------|---|------|
| 9.2      | Framtida utredning gällande vätgastankstationer ..... | 49   |
| 10       | Slutsats .....  | 51   |
| 11       | Litteraturförteckning .....                           | 53   |
| Bilaga 1 | - Flödesschema för driftlägen.....                    | i    |
| Bilaga 2 | - FMEA .....  | .iii |
| Bilaga 3 | - Indata för beräkningar.....                         | vii  |

# 1 Inledning

Denna rapport utgör den avslutande delen i utbildningen till brandingenjör samt civilingenjör i riskhantering på Lunds Tekniska Högskola, LTH.

I nedanstående kapitel presenteras bakgrunden till arbetet följt av beskrivningar av syfte och mål samt problemformulering och avgränsningar.

## 1.1 Bakgrund

Debatten över hur energi produceras och förbrukas har intensifierats över Europa. En ökad energiförbrukning i kombination med en ökad elbrist har lett till stigande elpriser. Samtidigt som det behövs en ökad energiproduktion pågår en miljöomställning, vilket skapar en konflikt över hur energin ska produceras. Utveckling av alternativa lösningar på energibärare och effektivisering av befintlig produktion är en nyckelfaktor för en framtida hållbar energianvändning.

Användningen av vätgas som alternativ energibärare har fångat intresset hos politiker och industrier. Vätgas har flertalet användningsområden och ses som en möjliggörare för att uppnå en ren, säker och ekonomisk hållbar energiförsörjning (Liljegren, 2020). Väte förekommer i kombination med syre i form av vatten eller med kol som organiska substanser. Genom att tillsätta energi kan vätet frigöras. Energin som tillsätts kan sedan återvinnas via en irreversibel process. Därför är vätgas ingen energikälla utan en energibärare (Jordan, 2022, s. 29). Genom att lagra överskottsenergi från gröna energikällor som exempelvis sol- och vindkraft i form av vätgas, gör vätgasanvändningen miljövänlig. Efterfrågan förväntas därför öka, för att exempelvis ersätta fossila bränslen inom transport (Liljegren, 2020).

Lagring och hantering är behäftade med risker och kan leda till stora konsekvenser om de inte hanteras på rätt sätt. Den 10 juni 2019 detonerade ett utsläpp från en vätgastankstation i Sandvika, Norge. Airbagen på personbilar som färdades på vägen utanför anläggningen löste ut av den resulterande tryckvågen från detonationen (Hansen, 2019). Incidenten granskades av NEL och deras utredning visar på att en liten läcka på 0,04g/s från en tank med 950 bars tryck läckte under några timmar. Det påfrestade läckaget övergick till en bristning, vilket ledde till att 1,5 - 3 kg vätgas frigjordes på 3s och därav detonationen (Ibid, 2019). Olyckan resulterade i att NEL valde att stänga ner samtliga vätgasstationer för att utreda vad som gått fel.

Detta examensarbete ska bidra till utvecklingen av säkrare lagring av vätgas. Användningen av vätgas som energibärare har stor potential, vilket gör att antalet vätgastankstationer förväntas öka. Med en ökad användning ökar efterfrågan på en säkrare och effektivare hantering. En ny norm, för tankstationer där vätgas används som bränsle för fordon, vid namn H<sub>2</sub>-TSA är under utveckling och där en remiss förväntas publiceras av Energigas Sverige under 2023. Examensarbetet kommer utgå från en typlanläggning av en vätgastankstation baserad på denna norm och utifrån en kvantitativ riskanalys (QRA) bedöma risken för läckage vid ändring av systemets skyddsnivå. Ventiler, materialval och kopplingar är exempel på komponenter som påverkar risken för läckage. Genom en parametrisk studie undersöks hur risknivån förändras om säkerhetssystem adderas eller tas bort samt om skyddsavstånd minskas. För att ha möjligheten att jämföra påverkan av olika säkerhetssystem används relativa risker. Resultatet av säkerhetssystem påverkan jämförs med kravställning enligt ett utkast av H<sub>2</sub>-TSA. Konsekvenser beräknas och analyseras utifrån att ett läckage antänt och resulterar i en jetflamma. Utifrån analysens resultat kommer skyddsbarriärer diskuteras med syfte att minimera risker och öka säkerheten för lagring av vätgas.

## 1.2 H<sub>2</sub>-TSA

Energigas Sverige arbetar för en ökad användning av biogas, fordonsgas, gasol och vätgas i Sverige. Organisationens medlemmar har expertis inom gasdistribution, installationsföretag, konsultföretag, tillverkare med flera. Organisationen och dess medlemmar strävar efter en förnybar teknikutveckling och energianvändning av gas. Energigas Sverige utvecklar vid examensarbetets utformande en remiss för hur tankstationer för vätgasdrivna fordon ska utformas, H<sub>2</sub>-TSA. Syftet med normen är följande, citerat av Energigas Sverige (2022):

*Dessa anvisningar ger exempel på konstruktion, tillverkning, anläggning, kontroll, drift och underhåll av tankstationer för vätgasdrivna fordon (Energigas Sverige, 2022).*

Detta examensarbete utgår och grundar sig i ett utkast av H<sub>2</sub>-TSA, daterat 2022-04-19. Den färdigställda och publicerade versionen kan ha reviderats vilket eventuellt medför att publikationen inte stämmer överens med innehållet i detta examensarbete.

## 1.3 Syfte

Syftet är att bidra till säkrare och mer kostnadseffektiva tankstationer och med underlag till framtida revideringar av H<sub>2</sub>-TSA.

## 1.4 Mål

Undersöka hur säkerhetsnivån förändras när man lägger till eller tar bort skydd i en typanläggning för en vätgastankstation.

## 1.5 Problemformuleringar

Examensarbetet ämnar besvara nedanstående frågeställningar.

- Hur påverkas systemet om skydd/barriärer tas bort/förändras?
- Vilka säkerhetssystem har störst påverkan på risknivån?
- Vilka typer av läckage bidrar till störst risk utifrån relativa risker? Vilket scenario ger största del av individrisken?

## 1.6 Begränsningar

Den brandteknisk analysen begränsar sig till att endast beräkna det primära effekterna vid en antändning av ett läckage, sekundära effekter utreds ej.

## 1.7 Avgränsningar

Arbetet kommer avgränsas genom att inte utreda eller analysera hur risknivån kring produktion av vätgas kan reduceras, utan arbetet förutsätter att det finns tillgänglig vätgas som kan lagras. För att få en uppfattning över potentiella brister och svagheter för en typanläggning, genomförs endast en grundläggande studie för processen.



## 2 Teoretisk bakgrund

I detta kapitel introduceras läsaren till vad vätgas är, syftet är att få en grundläggande förståelse för vätgasens egenskaper, beteenden samt hur de har använts historiskt. Läsaren introduceras även till de modeller och metoder som används för detta arbete.

### 2.1 Vätgas

#### 2.1.1 Användningsområde

Vätgas har flertalet användningsområden och används inte enbart som energibärare. Vätgas kan användas inom industrin på olika sätt. Exempelvis inom kemisk industri där vätgas används vid tillverkning av ammoniak eller för raffinaderier där råolja omvandlas till diesel eller bensin (Liljedal, 2017). Med nya användningsområden tillkommer nya risker och det kräver lösningar för en säker arbetsmiljö och hantering. Vätgas har använts inom industrin under lång tid, vilket gör att säkerhetslösningar för nya användningsområden bör projekteras utifrån den kunskap som redan finns tillgänglig (Ibid, 2017).

Aktiva vätgastankstationer finns i dagsläget över hela världen och fler stationer är planerade och projekteras (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, 2022). Stationerna används för att tillföra bränsle till främst personbilar, lastbilar, båtar och tåg. I regel omvandlas vätgasen till el och driver en elmotor med hjälp av bränsleceller där reaktionen resulterar i enbart vatten (Liljedal, 2017). Eftersom fordonets avgaser enbart utgörs av vatten har drivmedlet potential till att gynna en minskad klimatpåverkan. Under 2021 lanserade Gotlandsbolaget en konceptmodell för framtidens generation av fartyg (Morin, 2022). Gotland Horizon och Gotland Hydrocat är två modeller av fartyg som drivs av vätgas. Enligt Gotlandsbolagets konceptmodell ska resor till Gotland bli snabbare, flexiblare och mer hållbara än tidigare. Målet är att den första färjan ska vara i drift 2030 (Ibid, 2022).

#### 2.1.2 Egenskaper

Väte är den lättaste och minsta atomen i det periodiska systemet och har den kemiska beteckningen H. Vätgas består av två väteatomer och har den kemiska beteckning  $H_2$ . Väte förekommer knappt i naturen som rena väteatomer eller vätgas på grund av dess höga reaktionsförmåga med andra atomer.

Vid normalt tryck och temperatur är vätgas färglös, doftlös, smaklös, giftfri samt icke frätande vilket gör väte fysiskt ofarligt (Verfonden, 2022, p. 1). Däremot i miljöer med höga koncentrationer väte minskar koncentrationen syre vilket bidrar till hälsofarliga effekter på grund av syrebristen. Lyftkraft och diffusivitet är påverkande faktorer för hur väl vätgas blandar sig med luft (Ibid, 2022, p. 3). Då vätgas har hög lyftkraft och diffusivitet blandas vätgas med luft på ett effektivt sätt. Precis som andra bränslen och brännbara gaser är reaktionen med syre en del av förbränningsprocessen där energi bildas (Jordan, 2022, s. 60). Den effektiva omblandningen med luft är en säkerhetsrisk eftersom vätgas går mot dess breda brännbarhetsområde samtidigt som det krävs låg antändningsenergi för att antända. Den effektiva omblandningen kan även ske då gasen redan befinner sig inom sitt brännbarhetsområde vilket bidrar till en ökad säkerhetsrisk. Antändning av vätgasen sker från en tändkälla, exempel på tändkällor vid tankstationer är heta ytor, gnistor eller statisk elektricitet (Kotchourko, 2022, s. 127).

Vätes låga densitet vid normalt tryck och temperatur gör att det krävs att gasen komprimeras för att få en praktisk användning. 1 kg vätgas upptar en volym på  $11 \text{ m}^3$  vilket medför att det behöver komprimeras för att utnyttja ett begränsat lagringsutrymme (Jordan, 2022, s. 49). Eftersom vätgas behöver trycksättas för att hanteras medför det krav på systemet som hanterar gasen. Högre tryck

medför högre risker och utmaningar för att lagra gasen på ett säkert sätt, vilket ställer krav på design och egenskaper på behållaren (Suk-won, 2019).

### 2.1.3 Produktion

Vätgas kan produceras genom olika metoder. Exempel på två av metoderna är elektrolys och reformering. Elektrolys innebär att vatten spjälkas upp i syreatomer och väteatomer. Spjälkningen görs via energitillförsel i form av elektricitet. Beroende på hur elektriciteten producerats kan vätgasen definieras som klimatvänlig eller inte. Reformering är en process där naturgas eller biogas omvandlas till vätgas. Omvandlingen till vätgas görs i två steg. I det första steget bildas vätgas och kolmonoxid genom att vattenånga och natur- eller biogas blandas med en katalysator. Kolmonoxiden som bildas används sedan i steg två där kolmonoxid och vattenånga bildar ytterligare vätgas och koldioxid (Vätgas Sverige, 2023).

### 2.1.4 Historiska olyckor

Nedan beskrivs tre utvalda olyckor där vätgas varit inblandat. Utöver följande exempel finns ytterligare exempel på olyckor där vätgas varit involverat. I databasen HIAD 2.0 återfinns information om över 700 olyckor som inkluderar vätgas (hySafe, 2018).

#### Gangneung, Sydkorea 2019.

Först rubricerades en vätgastanksexplosion i Gangneung, Sydkorea 2019. Det visade sig att systemet innefattar mer än bara en tank där bland annat produktion av vätgas med elektrolys ingick. Till en början var det svårt för experter att veta vad som exakt orsakade explosionen på grund av systemets komplexitet. I en senare intervju av Airang News förklarar CHA Suk-won, professor på Department of Mechanical & Aerospace Engineering vid National University of Seoul, att explosionen orsakades av att väte spred sig över till syresidan i elektrolysrören (Suk-won, 2019).

Två personer dog och sex personer skadades av explosionen. Utöver personskador uppskattas explosionen kostat miljarder i materiella skador. Explosionen inträffade inom en teknikpark där flera företag var stationerade med syftet att föra utveckling av energi framåt. På området skadades bland annat utrustning som användes för att utveckla lagringsmöjligheter av solenergi (Ibid, 2019).

#### Sandvika, Norge, 2019

Vätgastankstationen i Sandvika, Norge drabbades av en explosion 2019. Olyckan orsakades av ett läckage som antändes vilket ledde till explosionen. Ett mindre läckage på 0,04 g/s pågick utan att detekteras under några timmar. Explosionen inträffade när en bristning på en tätning inträffade. När bristningen inträffade frigjordes 1,5 kg – 3 kg vätgas på 3s. Explosionen ledde till att fönster skadades på en kontorsbyggnad som låg 65 meter från stationen. Enligt norsk media utlöstes även airbagen på ett fordon som färdades utanför anläggningen i samband med explosionen (Hansen, 2019). Olyckan resulterade i att samtliga vätgastankstationer i Norge togs ur drift tills vidare.

#### Ilford, United Kingdom, 1975.

Den 5 april 1975 skedde en explosion på fabriken Laporte Industries Ltd i Essex, London. Fabriken tillverkade vätgas genom elektrolys (HM Factory Inspectorate, 1976, s. 5). Ett läckage uppstod och detekterades av personal några dagar innan olyckan inträffade. Systemet stängdes ned och läckaget reparerades innan verksamheten startade igen. Analysen av olyckan ifrågasätter om skadan reparerats eller om den orsakade explosionen. En syreseparator sprack och den antändes troligtvis av en elektrisk kortslutning. Personal som arbetade på plats intill separatoren skadades och omkom sedan på sjukhuset av skadorna (Ibid, 1976, s. 7).

### 2.1.5 Uppkomst av läckage

Flertalet vätgasolyckor initieras av en bristning i tank, koppling, tätning eller rörledning. Bristningen sker dels på grund av att väteatomernas påverkan på materialet dels på grund av dess låga viskositet. Stål är ett av materialen som förekommer vid lagring av vätgas i tryckkärl, men även komposit är vanligt förekommande. De små vätgasmolekylerna absorberas in i materialet och tränger sig in i små sprickor, vilket gör att dessa sprickor växer. Sprickorna genererar risken för brott i ett tidigare skede, det sker för att materialet blir sprödare (Kotchourko, 2022, s. 119). Sprödbrottsliknande bristningar som uppstår på grund av väte benämns som väteförspridning (Sällström, 2022).

Det är inte enbart tryckkärl som utsätts för påfrestningar från vätgasen. Rör, skarvar, flänsar och kopplingar mellan delar av ett vätgassystem utsätts för höga tryck och kräver bra kvalitet samt beständighet mot väteförspridning. Konsekvenserna vid ett läckage i en fläns kan bli förödande, likt förloppet i Sandvika.

Utöver lagring och distribution inom systemet är uppkomst av läckage möjlig inom kompressorer och dispenser. Kompressorn och dispensern är i större utsträckning beroende av andra komponenters funktion. Tryckvakter, temperaturvakter, flödesmätare och aktiva ventiler är exempel på komponenter inom systemet som riskerar att bidra till läckage vid en felfunktion.

Beroende på typ av läckage kan följande fyra händelser inträffa: läckaget detekteras och isoleras, ingen antändning sker, jetflamma eller explosion. Det olika typerna beskrivs vidare i avsnitt 3.2, se Figur 1 händelseförlopp vid uppkomst av läckage.

### 2.1.6 Vätgas ur brandteknisk synpunkt

En vätgaslåga kan vara svår att identifiera då den i princip kan vara osynlig. Beroende på förutsättningar kan flammans färg vara gulaktig eller blå. Beroende på förbränningens förutsättning kommer olika scenarier utspelas vid antändning. Vätgas kan antändas under två olika förhållanden, förblandad eller inte förblandad med luft innan antändning. En förblandad mix av vätgas och luft, leder till en explosion medan en icke förblandad mix leder till ett brandscenario som vanligtvis resulterar i en jetflamma (Kotchourko, 2022, s. 127).

Det mest väsentliga antändningskällorna är gnistor, smälta kablar, eldsvådor, heta ytor, snabb adiabatisk tryckökning eller chockvågor (Kotchourko, 2022, s. 134). Under vissa förhållanden kan även vätgas självantända (Ibid, 2022, s.135) Antändning av vätgas kan endast ske då koncentrationen är inom brännbarhetsområdet samt då energiutvecklingen är högre än den specifika nivån för vätgas. Brännbarhetsgräns och antändningsenergin för att antändning ska ske är beroende av temperatur och tryck (Ibid, 2022, s. 135). Vid beräkning av konsekvenser för antändning av vätgas antas tryck var atmosfärstryck och temperaturen vara rumstemperatur, dvs 101 325 Pa respektive 20 °C. Brännbarhetsområde samt antändningsenergi presenteras i Tabell 1 nedan (Ibid, 2022, s. 135). Stökiometrisk koncentration i luft är 29,5% (Deimer, 2000, s. 12). Notera att om temperatur och tryck ökar eller sänks förändras brännbarhetsområde och antändningsenergi.

Tabell 1 brännbarhetsområde och antändningsenergi för vätgas (Kotchourko, 2022, s. 135)

| Temperatur | Tryck      | LFL % | UFL % | Antändningsenergi vid stökiometriskt förhållande |
|------------|------------|-------|-------|--|
| 20 °C      | 101 325 Pa | 4,1%  | 75,6% | 0,017mJ  |

## 2.2 Modeller

### 2.2.1 QRA

Arbetet grundar sig i en QRA, Quantitative Risk Analysis/Assessment. QRA är en analysmetod som används för att karaktärisera och bedöma risknivån. Genom att analysera flera tänkbara scenarier kan den mest ogynnsamma risknivån analyseras. Analysen bygger på följande process som refererar till den process som Tehler beskriver i *An introduction to risk and risk management* (Tehler, 2020):

1. Första steget är att bilda sig en uppfattning om förutsättningarna och skapa en kontext.
2. Andra steget är att identifiera vilka risker som finns. För detta arbete identifieras riskerna med en FMEA, vilket beskrivs i nästkommande avsnitt.
3. Det tredje steget är att analysera det identifierade riskerna och besluta vilka risker som, för analysens del, utgör ett säkerhetsproblem. Identifierade risker behöver inte utgöra en risk för arbetets problemställning utan kan utgöra en risk för andra faktorer som exempelvis ekonomiska.
4. Det fjärde steget är att värdera risken. Värderingen lägger sedan grund för vilken typ av åtgärd som ska tas för att minimera risken för den specifika felmoden ska uppstå. Själva kvantifieringen är det som symboliserar en QRA där riskerna översätts i ett värde med siffor.

När QRAN är genomförd är det viktigt att utvärdera och återkoppla. Utvärderings syfte är att se över om det integrerade valda åtgärder reducerade risken och hanterade problemet för systemet i praktiken. Om det riskreducerande åtgärderna är lika effektiva som de uppskattades. För system med säkerhetsproblem som utspelar sig ett fåtal gånger under systemets livslängd blir utvärdering svår att genomföra. För system med återkommande problematik är utvärdering av det riskreducerande åtgärderna mindre komplicerade.

### 2.2.2 Relativa risker

Risker kan vara svåra att tolka och jämföra. Genom att använda relativa risker kan en risk jämföras med en annan. Den relativa risken beräknas genom kvoten mellan två risker, där behandlingsgruppen divideras med en kontrollgrupp (Internetmedicin AB, 2022). För analysens fall är kontrollgruppen grundläget och behandlingsgruppen den beräknade risken utifrån de olika designvariationerna. Om kvoten är över 1 betyder det att behandlingsgruppen utgör en större risk jämfört med grundläget och under 1 betyder att behandlingsgruppen utgör en lägre risk jämfört med grundläget. Då olika behandlingsgrupper divideras med samma kvotgrupp kan de jämföras direkt med varandra där det större värdet utgör en större risk. Nackdelen med relativa risker är att de inte kan jämföras med andra relativa risker för andra system. Ytterligare nackdel kan vara att risken måste uttryckas som ett siffervärde. Informativa riskmått som en statistisk fördelning kan inte jämföras lika enkelt. Olika system utgörs även av olika förutsättningar och är definierade med olika antaganden, vilket inte gör jämförelsen representativ.

### 2.2.3 FMEA

Failure mode and effect analysis är en metod för att identifiera säkerhetsproblem inom ett system. Metoden bygger på att identifiera hur samtliga komponenters sårbarheter påverkar systemet. För detta arbete kan komponenter exempelvis vara tryckvakt, temperaturgivare, ventiler, flödesmätare eller kompressorer. Samtliga komponenter inom systemet analyseras utifrån dess felmoder. Beroende på varje ingående komponents syfte varierar felmod och dess konsekvens. Det är viktigt att analysen utgår från ett syfte som finns med i åtanke hos användaren. Om syftet är att ett system ska vara så säkert som möjligt eller så tillgängligt möjligt är väsentligt för hur felmoderna påverkar systemet. Exempel på felmod är en obefogad stängd ventil, vilket gör systemet obrukbart men där den obefogade stängda ventilen inte utgör något säkerhetsproblem.

Metoden bygger på att utifrån komponentens typ, placering, driftläggning, felmod, konsekvens, felets upptäck och frekvens så görs bedömningen om komponenten utgör ett problem eller inte. De komponenter som utgör ett problem för systemet analyseras vidare med syfte att identifiera åtgärder för att minimera effekterna av ett fel. Frekvensen för att läckage uppstår inom en komponent tas inte hänsyn till i FMEA:n, den typen av läckage behandlas direkt i HyRAM+.

#### 2.2.4 Felträdsanalys

Felträdsanalys är en kvantitativ analysmetod som med diagram av olika typer av felfunktioner leder till en specifik händelse, topphändelse (Ingvarson & Roos, 2003, s. 20). Från topphändelsen förgrenas diagrammet ner till bashändelserna genom logiska grindar. Exempel på två typer av grindar är OCH- och ELLER-grind. En OCH-grind används om två eller flera olika händelser måste inträffa för att ett scenario ska inträffa. Exempelvis att två tryckvakter ska fela samtidigt för en utebliven start av en kompressor. ELLER-grind används om det enbart är en av två eller flera olika händelser som måste inträffa för att ett scenario ska inträffa. Exempelvis att två ventiler är seriekopplade i ett rörsystem. Om en ventil stänger uteblir flödet. Sannolikheten eller frekvensen för topphändelsen beräknas med ett antal räkneregler som är kopplade till det olika typerna av grindar (Ibid, 2003, s. 21).

För ett system med flertalet komponenter resulterar olika fel i skilda scenarier. Konsekvensen för en specifik olycka beror på systemets uppbyggnad och hur olika komponenter är beroende av varandra. Genom att systematiskt identifiera möjliga beroenden och sekvenser bildas ett felträd med det logiska grindarna. Beroende på syftet med analysen kan sannolikhet, frekvens eller intensitet beräknas.

#### 2.2.5 Händelseträdsanalys

Händelseträdsanalys syftar till att kartlägga samtliga givna händelsekedjor följt av en given händelse. Identifierade händelsekedjor bygger på en kronologisk ordning som sedan kan kvantifieras till sannolikheter eller frekvenser för de olika sluthändelserna (Ibid, 2003, s.22). Den specifika händelsen som händelseträdet utgår från kan vara samma händelse som topphändelsen i ett felträd. De två olika analysmetoderna kan därför sammanvägas och förenas till en Bow-tie. Som är ett felträd och ett händelseträd som kompletterar varandra till ett gemensamt logiskt diagram. Syftet med att slå ihop träden till en Bow-tie är att få en tydlig och illustrerad helhetsbild över hela händelseförloppet, från fara till konsekvens.



### 3 Metod

I följande kapitel beskrivs inledningsvis arbetets övergripande metodik och därefter presenteras en mer detaljerad beskrivning av varje enskilt delmoment. Genom nedanstående angreppssätt är avsikten att besvara samtliga problemformuleringar, se avsnitt 1.5.

#### 3.1 Metodöversikt

Arbetet utförs genom en parametrisk studie som baseras på en kvantitativ riskanalys (QRA) för att uppskatta hur risknivån förändras om säkerhetssystem adderas eller tas bort. För att ha möjligheten att jämföra påverkan av säkerhetssystem används relativa risker. Resultatet antas bli mer intressant och generaliserbart jämfört med exempelvis att jämföra med specifika acceptanskriterier.

Första steget i analysen är att kartlägga systemet och förstå hur komponenter interagerar med varandra. Genom att använda metoden FMEA kan brister och möjliga konsekvenser identifieras (Hawsworth et al, 2022). Efter att typanläggningens grundläge är definierad, beräknas individrisk, i HyRAM+. Utifrån resultatet från FMEA:n och systembeskrivningen illustreras designvariationer av grundläget där säkerhetssystem adderas eller tas bort. Samtliga designvariationer modelleras och beräknas separat i HyRAM+ där beräknade individrisker jämförs mot grundläget genom relativa risker. Utifrån de relativa riskerna diskuteras det om de olika designvariationerna bidrar till säkrare och mer kostnadseffektiva tankstationer. Beräknade konsekvenser beroende på läckagestorlek analyseras och diskuteras utifrån ett brandtekniskt perspektiv. Med resultatet från den parametriska studien och de beräknade konsekvenserna diskuteras förslag på riskreducerande åtgärder för en typanläggning med lagring av vätgas. Diskussionen beaktar befintliga regelverk och policys för hantering av vätgas, dels riktlinjer från H<sub>2</sub>-TSA dels från EU.

#### 3.2 HyRAM+

HyRAM står för Hydrogen Risk Assessment Models och är ett verktyg för att värdera potentiella faror och risker relaterat till produktion, lagring, transport och användning av vätgas, propan och metan. Programmet innehåller modeller som bygger på egenskaper hos gasen, design på anläggningen samt vilka potentiella konsekvenser en olycka kan leda till. Målet är att identifiera och utvärdera de potentiella riskerna och utveckla strategier för att hantera och mildra riskerna. Sannolikhetsdata för olika typkomponenter inom generella vätgasanläggningar är samlade i programmet, vilket gör att programmet lämpar sig för detta arbete. HyRAM+ har två beräkningsmoduler, en modul grundas på QRA och den andra modulen grundas på fysikaliska samband. Användaren kan beräkna modulen fysikaliska samband separat utan att ta hänsyn till beräkningsstegen i QRA modulen.

Modulen QRA bygger på en klassisk QRA, se avsnitt 2.2.1, där första steget är att identifiera och definiera sitt system i programmet. Ingående komponenter, rördimensioner, antal tankningar och anläggningens storlek är några av de faktorer som definieras för att beräkna risken för läckage. Samtliga komponenter har en frekvens för uppkomst av läckage. Antalet komponenter påverkar därför förväntade antalet felmoder som kan leda till läckage. Beroende på omfattningen av komponenter ökar eller minskas det totala riskmåttet. Riskmått som beräknas i HyRAM+ är "Potential Loss of Life" (PLL), "Fatal Accident Rate" (FAR) och Average Individual Risk (AIR), se Tabell 2.

Tabell 2 förkortningar av riskparametrar inom HyRAM+ (Ibid, 2021, s. 10)

| Förkortning      | Fullständigt namn       | Förklaring   |
|------------------|-------------------------|--|
| AIR <sup>1</sup> | Average individual risk | Förväntat antal dödsfall per exponerad individ och år. |
| FAR              | Fatal accident rate     | Förväntat antal dödsfall per 100 miljoner timmar.      |
| PLL              | Potential loss of life  | Förväntat antal dödsfall per system-år.                |

Risken för dödsfall som bearbetas och analyseras för detta arbete är individrisk, FAR. Individriskkriteriet används för att begränsa risken för individer som befinner sig nära och inom verksamheten. Den totala risken beräknas genom att summera beräknade risker för fem olika storlekar av läckage. Läckagen som beräknas är 0,01%, 0,1%, 1%, 10% och 100% av rörets area, där rördiametern definieras av användaren och som sedan beräknas till area av programmet. I detta arbete analyseras det största läckaget med en håldiameter på 8 mm. Antagandet bygger på att rörledningar inom systemet har en inre diameter på 8 mm. Storleken på läckaget definieras som mycket små, små och fullständiga. Tabell 3 hålstorlek för olika typer av läckage redovisar håldiametern för olika typer av läckage.

Tabell 3 hålstorlek för olika typer av läckage

| Typ av läckage | Andel                | Håldiameter |
|----------------|----------------------|-------------|
| Mycket små     | 1% av rördiameter    | 0,8 mm      |
| Små            | 10% av rördiameter   | 2,53 mm     |
| Fullständigt   | 100% av rördiametern | 8mm         |

Utöver tidigare nämnda riskmått beräknas även följande av programmet:

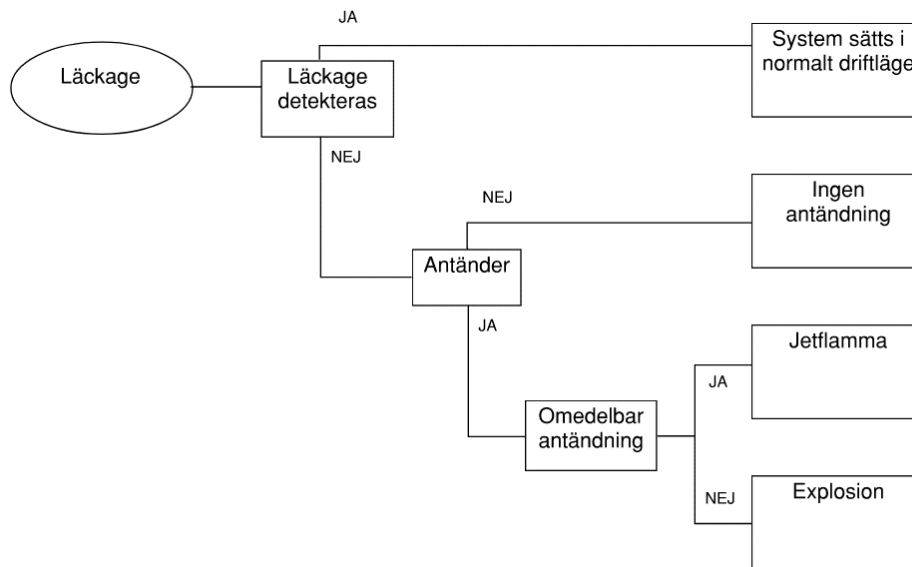
- Förväntat antal vätgasutsläpp per system-år, antända och icke antända utsläpp.
- Förväntat antal jetflammar vid omedelbar antändning per system-år.
- Förväntat antal deflagrationer/detonationer per system-år.

Uppkomst av läckage leder till fyra olika kategorier av konsekvenser, händelseförloppet summeras i Figur 1. Då ett läckage uppstått inom en vätgasanläggning är en första skyddsbarriär att detektera och isolera läckaget. Det görs exempelvis genom detektorer och automatiska ventiler. Om läckaget inte detekteras och isoleras är konsekvensen beroende av om gasen antänds eller inte. Det tre olika scenarierna vid ett läckage är: icke antänt, direkt antändning och fördröjd antändning. Om gasen antänds blir konsekvensen en jetflamma eller explosion beroende på tiden det tar för gasen att antända. En fördröjd antändning leder till en explosion på grund av att gasen förblandas med syret innan antändning, se avsnitt 2.1.6.

---

<sup>1</sup> AIR är ett riskmått som beräknas i HyRAM+, riskmättet motsvarar inte det klassiska riskmättet individrisk.





Figur 1 händelseförlopp vid uppkomst av läckage

Sannolikheten för de olika konsekvenserna i Figur 1 beror på läckagets storlek. För läckage med stora massflöden ökar sannolikheten för att gasen antänder, se Tabell 4. I HyRAM används följande sannolikheter för ett direkt antänt läckage och för en fördröjd antändning (Groth & Hecht, 2016, s. 7490).

Tabell 4 sannolikhet vid olika massflöden

| Massflöde (kg/s) | Sannolikhet: Direkt antändning | Sannolikhet: Fördröjd antändning |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <0,125           | 0,008                          | 0,004                            |
| 0,125 - 6,25     | 0,053                          | 0,027                            |
| >6,25            | 0,23                           | 0,12                             |

Beräkningsmodulen fysikaliska samband beräknar konsekvenser av läckage. Beräkningarna kan göras utan koppling till de beräkningar som görs i modulen QRA. För detta arbete görs kopplingen genom att beräkna konsekvenser för de olika läckagestorlekar som beräknas i QRA. HyRAM+ kan beräkna flertalet fysikaliska effekter (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 11)

- Koncentration vätgas för icke antända läckage.
- Jetflammans temperatur och riktning.
- Jetflammans strålning ( $\text{kW/m}^2$ ) för specifika positioner som användaren definierat.
- Avstånd för strålning av en jetflamma som användaren definierat.
- Hur koncentration, brännbar mängd och övertryck förändras över tiden vid ett läckage.

Resultatet från användarens beräkningar bör ses som en del av beslutsprocessen. En säker och pålitlig design är framtagen utifrån flertalet bedömningar. HyRAM+ tillåter inte användaren att specificera acceptabla riskkriterier i programmet. Resultatet från beräkningarna bör därför ställas mot föreskrifter och krav för att uppfylla en säker design.

### 3.2.1 Beräkningar - QRA

Följande kapitel redogör hur HyRAM+ beräknar det resultat som arbetet analyserar. Redogörelsen bygger på egna erfarenheter från programmet samt utifrån HyRAM+ - technical reference manual (Ibid, 2021).

Examensarbetets analys bygger på riskerna som görs beräknas i HyRAM+, för definitioner av risker se Tabell 2. AIR, beräknas utifrån följande ekvation.

*Ekvation 1*

$$AIR = H \times FAR \times 10^{-8}$$

Där H är antalet timmar en individ förväntas vara inom anläggningen per år. AIR som beräknas och används för att kvantifiera designvariationerna för typanläggningen motsvarar inte en klassisk individrisk. Individrisk avser sannolikheten för personer att omkomma eller skadas inom eller i närheten av ett system. Individrisken är dock oberoende av antalet personer som vistas inom systemet (Ingvarson & Roos, 2003, s. 59). För att beräkna AIR används FAR, där FAR är en mer klassisk individrisk (Davidsson, 2003, s. 136). FAR är i sig en riskparameter som beräknas i programmet. FAR beräknas med följande ekvation.

*Ekvation 2*

$$FAR = \frac{PLL \times 10^8}{Exposed\ hours} = \frac{PLL \times 10^8}{N_{pop} \times 8760}$$

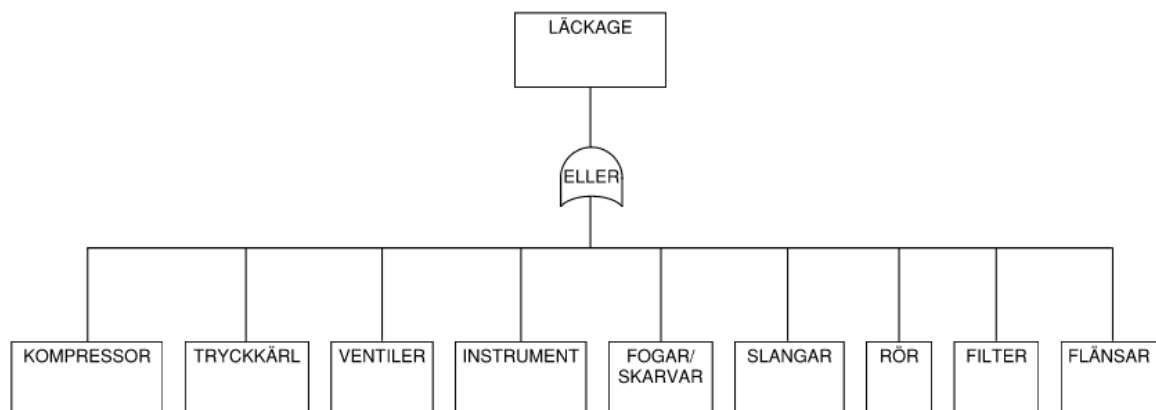
$N_{pop}$  är genomsnittligt antalet anställda som förväntas vistas inom anläggningen, vilket multipliceras med antalet timmar på ett år. Täljaren multipliceras med  $10^8$  för att beräkna FAR per 100 miljoner år. Personal som arbetar på stationer utför uppdrag som exempelvis underhåll, servicearbeten eller påfyllnad av systemet. Syftet med examensarbetet är att jämföra risknivån beroende av säkerhetsnivå, vilket görs genom relativa risker. Oberoende av vilket riskmått, AIR eller FAR, som används kommer det relativa riskerna resultera i samma kvot. Eftersom antalet timmar en individ förväntas vara inom anläggningen per år (H, se Ekvation 2) är den samma för samtliga designvariationer. Således kommer endast FAR påverka den relativa risken.

För att räkna ut FAR krävs det att räkna ut PLL, vilket precis som FAR också är en riskparameter i programmet. PLL nyttjas för att beräkna andel av förväntat antal dödsfall per system-år som beror på läckagestorlek och dess konsekvens. Exempelvis hur stor andel av de förväntat antalet dödsfall per system-år är på grund av jetflammar med 10% läckagestorlek.

*Ekvation 3*

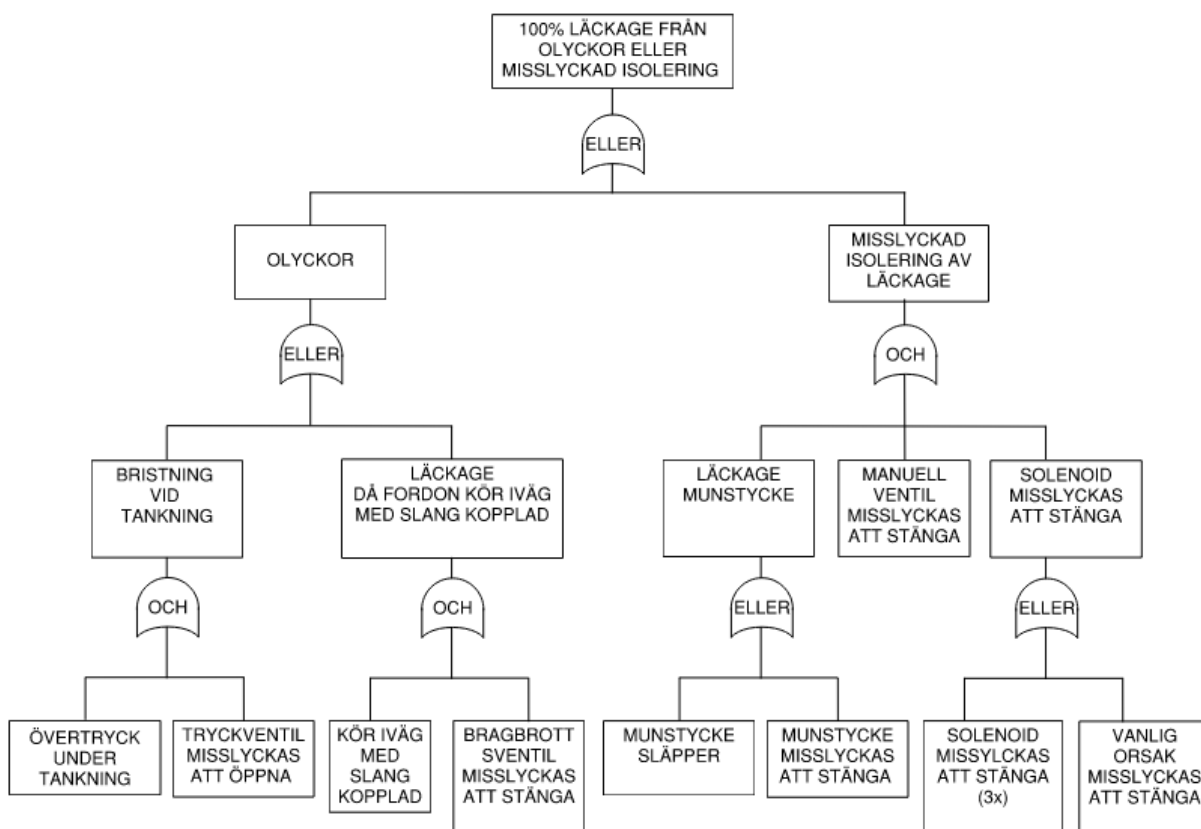
$$PLL = \sum_n (f_n \times c_n)$$

PLL beräknas, enligt Ekvation 3, genom att summera produkten av frekvensen av olycksfall multiplicerat med förväntat antal olycksscenarioer som leder till att någon avlider. Typer av läckage delas upp till slumpmässiga läckage och fullständiga läckage vid dispenser. Det två olika typerna av läckage illustreras med felträd. Det första felträdet illustrerar slumpmässiga läckage för samtliga komponenter och läckagestorlekar inom systemet.



Figur 2 Beskriver felträd för slumpmässiga läckage (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 18)

Det andra typen av läckage illustreras i det andra felträdet där topphändelsen är olyckor och misslyckade nedstängningar. Exempel på bashändelser till läckage, antas ske från dispensern där handhavande fel och utebliven stängning av magnetisk ventil (solenoid).



Figur 3 beskriver felträd för övriga fullständiga läckage på dispenser (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 22).

För slumpmässiga läckage beräknas den totala frekvensen för respektive läckagestorlek. Det görs genom att summerna av antalet specifika komponenter multiplicerat med dess felfrekvens

för respektive läckagestorlek. De specifika komponenterna definieras av användaren vid det första steget i QRA modulen. Frekvensen av olycksfall beräknas genom att summera produkten av antalet komponenter multiplicerat med frekvensen för läckage per komponent och läckagestorlek, se Ekvation 4. För fullständiga läckage beräknas frekvensen av slumpmässiga läckage enligt Ekvation 5 (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 17). Övriga utsläpp symboliserar olyckor och misslyckade avstängningar vid dispenser där eventuella läckage antas leda till fullständiga läckage.

Ekvation 4

$$f_{Random\ Releases,k} = \sum_i N_{Component_i} \times f_{Leak_{i,k}}$$

Ekvation 5

$$f_{H2\ Releases,100\%} = f_{Random\ Releases,100\%} + f_{Other\ Releases}$$

Frekvensen för slumpmässiga läckage beskrivs av en lognormal fördelning, se ekvation 6. Medelvärden för frekvenser finns lagrade i HyRAM+, befintliga medelvärden redovisas i Tabell 5. För detta arbete används befintliga data men data kan modifieras utifrån andra datakällor. Exempelvis om användaren vill räkna på en specifik typ av ventil och har data för den. Befintliga data som används i programmet härstammar från Sandia National Laboratories rapport, "Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards" skriven av LaChance et al. (2009).

Ekvation 6

$$f_{leak} \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2)$$

Tabell 5 felfrekvens per år för komponenter i HyRAM+

| Komponent       | Läckage - 1%         | Läckage - 10 %       | Läckage -100%        |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Kompressor      | $6,4 \times 10^{-3}$ | $2,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ |
| Tryckkärl       | $9,6 \times 10^{-7}$ | $5,4 \times 10^{-7}$ | $2,8 \times 10^{-7}$ |
| Ventiler        | $1,0 \times 10^{-4}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| Filter          | $1,1 \times 10^{-2}$ | $6,1 \times 10^{-3}$ | $6,1 \times 10^{-3}$ |
| Fläns           | $2,0 \times 10^{-3}$ | $3,5 \times 10^{-5}$ | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| Slang           | $2,0 \times 10^{-4}$ | $1,8 \times 10^{-4}$ | $1,0 \times 10^{-4}$ |
| skarvar         | $9,1 \times 10^{-6}$ | $9,1 \times 10^{-6}$ | $8,0 \times 10^{-6}$ |
| Rör (per meter) | $2,1 \times 10^{-6}$ | $9,4 \times 10^{-7}$ | $8,1 \times 10^{-7}$ |
| Instrument      | $1,7 \times 10^{-4}$ | $1,8 \times 10^{-4}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ |

Sannolikheten för skada eller död vid en given exponering multipliceras sedan med antalet timmar på ett år för att få ett värde på antalet olycksscenarioer som leder till att någon avlider,  $C_n$ . Sannolikheten för skador eller dödsfall vid termiska effekter och effekter av ett övertryck beräknas enligt följande probitfunktion, se Ekvation 7.

Ekvation 7

$$P(\text{Fatality}) = F(Y|\mu = 5, \sigma = 1) = \Phi(Y - 5)$$

HyRAM+ använder ett medelvärde på 5 och en standardavvikelse på 1 för att undvika negativa värden. I dagsläget är det mer generellt att använda sig av medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1, vilket gör att probitfunktionen förknippas med en normalfördelning (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 27).

Modellerna för termiska skador och dödsfall beräknas med följande funktioner:

*Ekvation 8*

$$Y = -38,48 + 2,56 \times \ln(V)$$

V är en termisk dos som motsvarar den strålning som en människa utsätts för vid en jetflamma under en given exponeringstid.

*Ekvation 9*

$$V = I^{4/3} \times t$$

I är strålningen per kvadratmeter (W/m<sup>2</sup>) och t är exponeringstiden. Tiden är förinställd på 60 sekunder men går att justera av användaren.

För scenariot med övertryck används följande probitfunktion.

*Ekvation 10*

$$Y = 5 - 0,22 \ln[(40000/P_s)^{7,4} + (460/i)^{11,3}]$$

P<sub>s</sub> är maximala övertrycket (Pa) och i är chockvågens impuls (P<sub>s</sub> \*s).

### 3.2.2 Beräkningar - Fysikalisk modell

Beroende på vilken typ av förbränning som beräknas i HyRAM+ används olika beräkningsmodeller. Flamlängd, massflöde och strålning är exempel på parametrar som kan beräknas i programmet. Beräkningsmodellerna i HyRAM+ som används i detta examensarbete bygger på ett antal antaganden.

- Förbränningen antas vara fullständig vilket innebär att där inte förkommer några förluster.
- För icke antända jets eller plymer antas hastighet, densitet och massfraktion för gasen vara normalfördelad. Liknande antaganden görs även för antända jetflammar.
- Endast ett läckage antas förekomma, flertalet antändningar tas inte hänsyn till.

Vid beräkning av läckage används en ekvivalent öppning. Ekvivalent öppning motsvarar det engelska begreppet "Notional nozzle model". Den ekvivalenta öppningen används för att beräkna den effektiva öppningsarean och termodynamiskt tillstånd för att förenkla den komplexa strukturen på flödet då trycket vid öppningen överstiger atmosfärstryck och där hastigheten antas vara ljudets hastighet (Ibid, 2021, s.34). I HyRAM+ finns fem olika modeller för hur programmet beräknar den ekvivalenta öppningen.

- Yuceil/Otugen (Förinställd modell)
- Birch
- Birch2
- Ewan/Moodie
- Molkov

Den synliga flamlängden beräknas utifrån Houf and Schefers modell för dimensionslösa flamlängder för att uppskatta den faktiska flamlängden. Den synliga flamlängden beräknas utifrån följande ekvation:

Ekvation 11

$$L^* = \frac{L_{vis} f_s}{d_j \sqrt{\rho_j / \rho_{amb}}}$$

$L^*$  är den dimensionslösa flamlängden som är beroende av Froudes tal. Froudes tal uppskattar betydelsen av förhållandet mellan tröghetskraft och tyngdkraft (Nationalencyklopedin, 2023). Genom att beräkna Froudes tal kan den dimensionslösa flamlängden läsas av i ett diagram (ibid, 2021, s.43).  $f_s$  är massfraktionen för vätgas vid stökiometrisk blandning.  $d_j$  är diametern på öppningen,  $\rho_j$  och  $\rho_{amb}$  är densiteten för gasen vid öppningen respektive luftens densitet.

## 4 Systembeskrivning

I följande kapitel presenteras och beskrivs typlanläggningen för analysen. Systembeskrivningen utgår från de flödesschema och krav som definieras i H<sub>2</sub>-TSA. För att verifiera att framtagen typlanläggning representerar en tankstation på bästa sätt jämförs den med andra fabrikat och leverantörer av vätgastankstationer. Stationernas utformning är liknande men där storlek och utformning på tanken skiljer dem åt. Designen beror exempelvis på om vätgasen produceras på plats eller om den blir transporterad dit. H<sub>2</sub>-TSA omfattar inte anläggningar där vätgas produceras på plats. En generell utformning består av en tank, kompressor, buffert (mindre tank där komprimerad gas lagras) och en dispenser.

MSB har föreskrifter för befintliga tankstationer för andra drivmedel som exempelvis bensin och diesel. Även Energigas Sverige har befintliga normer som exempelvis TSA2020 (CNG) och LNGA (LNG). Drivmedlens egenskaper skiljer sig från vätgasens egenskaper vilket skapar olika förutsättningar för att säkerställa risknivån. Även om förutsättningarna är olika finns där riskreducerande åtgärder oavsett drivmedel på anläggningen. Åtgärder som exempelvis fysisk avskiljning och dragbrottsventil är fysiska barriärer som även förekommer på vätgastankstationer.

### 4.1 Systemets uppgift

Systemets uppgift är att förse vätgasdrivna fordon med bränsle. Vätgasen produceras antingen på anläggningen eller transporteras dit och lagras i någon form av tank. Analysen begränsar sig till att vätgas finns lagrat på plats. Vilket utesluter risker vid tillverkning eller påfyllnadsprocess av vätgas till systemet.

### 4.2 Konstruktionsförutsättningar

#### 4.2.1 Hantering och regelverk

På grund av att vätgas är en brandfarlig och explosiv gas ställer AFS och MSB krav på hantering. AFS ställer även krav utifrån att vätgasen trycksätts vilket är oberoende av dess egenskaper. Syftet är att förhindra olyckor orsakade av trycksatta eller brandfarliga gaser (vätgas) med konsekvens för arbetande på anläggningen, med krav att förebygga explosiv atmosfär och krav på att förebygga konsekvenser vid en olycka. Med explosiv atmosfär menas koncentrationen gas i luft där den kan antändas (MSB, 2019). Föreskrifterna enligt AFS och tryckkärlsdirektivet PED genomför ATEX-direktivet i svensk lagstiftning, reglerna är gemensamma inom hela EU. Explosionsfarlig miljö, ATEX (ATmosphères EXplosives), ställer krav på bland annat märkning och zonklassning av angränsande område. En anläggning kan ha flera zoner beroende på i vilken utsträckning explosiva gaser förekommer. Lagar och föreskrifter gällande hantering av vätgas skiljer sig åt mellan kontinenterna. Exempelvis i Amerika är krav på säker design, testning, konstruktion samt vart stationen får placeras mer direkta och precisa. Jämfört med Europa där kraven inte är lika direkta utan med hjälp av lagar och föreskrifter som exempelvis ATEX-direktivet, designas och verkställas stationerna på ett säkert sätt (Moretto & Quong, 2022, s. 352).

För att möjliggöra hantering av vätgas krävs tillstånd enligt LBE, Lagen om brandfarliga och explosiva varor (2010:1011). Syftet med LBE är att skydda, förbygga och begränsa olyckor som kan uppstå vid hantering av brandfarliga och explosiva varor (MSB, 2020). Genom att följa den kravställning som MSB och AFS utfärdat uppfylls kraven.

#### 4.2.2 Standard

Utöver de föreskrifter som MSB och AFS ger ut, finns flera standarder på hur en säker vätgashantering kan tillämpas. Standarder är inget krav om det inte refereras i lagstiftningen utan standarder är endast en lösning på återkommande problem. Syftet är att upprätta en gemensam,

enhetlig och transparent lösning och rutin för att åtgärda problemet (Svenska Institution för standarder, 2022). Följande avsnitt beskriver väsentliga rådande standarder för vätgas och tankstationer.

- **SS-EN 17127:2018, Vätgas - Tankning utomhus vid vätgasenheter med fyllningsprotokoll.**

Syftet med standarden är att definiera de minimala krav som krävs för att upprätthålla säker drift av en vätgasstation. Standarden poängterar den betydande effekten kommunikationen har inom systemet. Detekterat fel ska trigga systemet att avbryta tankningsprocessen och säkerställa hanteringen. Vidare beskrivs även hur anläggningen ska besiktas innan den tas i bruk. Kontinuerlig service och inspektion ska förekomma för att upprätthålla en säker miljö (SIS, 2018).

- **SS-ISO 26142:2020, Vätgasdetektering – Stationär utrustning (ISO 26142:2010, IDT).**

Standarden syftar till att definiera krav och testmetoder för detektionsutrustningen som är designat för att detektera, mäta och övervaka koncentrationen vätgas för en stationär anläggning (SIS, 2022).

- **SS-EN 17533:2020, Vätgas – Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring.**

Standarden specificerar design och egenskaper på olika sorters cylindrar, tuber och tryckkärl med en kapacitet på maximalt 10 m<sup>3</sup> och ett maximalt tryck på 1100 bar (SIS, 2020).

- **SS-ISO 19880, Tankstationer – Del 1: Generella krav (ISO 19880-1:2022, IDT)**

Standarden definierar minimumkrav för att säkerställa säkerhet och prestanda för en tankstation för vätgas. Eftersom standarden endast påvisar minimumkrav rekommenderas det att tillämpa riskhanterings metoder för att belysa potentiella risker för varje enskild anläggning. Varje enskild anläggning påverkas av olika förutsättningar, exempelvis angränsade miljö eller väderförhållanden (SIS, 2022).

- **SS-EN 17124:2022, Vätgasbränsle – Produktspecifikation och kvalitetssäkring för tankstationer för vätgas.**

Standarden beskriver de egenskaper vätgasen ska ha för att vara behörig att användas som drivmedel. Vätgasen ska innehålla 99,97 mol% väteatomer, för att uppnå mängden väte som krävs beskrivs tillvägagångssättet för att kontrollera kvalitén (SIS, 2022).

- **ISO/TR 15916:2015, Basic considerations for the safety of hydrogen systems**

Syftet med standarden är att ge en djupare förståelse för de risker som medförs med anläggningar som behandlar olika gaser, vilket inkluderar väte. Riktlinjer ges för användning av väte och hur det hanteras på ett säkert sätt. Rapporten förklarar problematiken gällande säkerhet, faror och risker och beskriver vilka faktorer som är relevanta för att höja säkerhetsnivån (ISO, 2015).

#### 4.2.2.1 SIL klassning

SIL-klass är ett mått på integritetsnivå för säkerhetsfunktioner inom ett tekniskt system. SIL står för Safety Integrity Level och utgör en del av standarden IEC 61508 (Sodré & James, 2022). SIL-klass bedöms utifrån att identifiera samtliga säkerhetssystem och genomföra en riskanalys för systemet. Utifrån resultatet utformas SIL och verifieras för att säkerhetsställa att integritetsnivån är tillräcklig (Ibid, 2022). SIL-klass används vanligtvis för exempelvis tryckkärl, pannor eller detektionssystem. Genom att införa SIL-klassning på vätgastankstationer blir risknivån homogen över samtliga leverantörer då skyddsmålet blir gemensamt. Mått för säkerhetsfunktionerna utgör nivå 1 till nivå 4, där nivå 4 är säkrare och har en lägre felsannolikhet. Gränsvärdena för de olika nivåerna styrs av standard IEC 61508. Standarden specificerar de faror som kan infinna sig när säkerhetsfunktioner felar. Syftet med standarden är att reducera risken vid fel till en acceptabel nivå (Richard Bellairs,



2019). Utöver SIL-klassning finns där andra standarder som använder sig av andra typer av nivåer. Exempel på andra standarders nivåer är ASIL, LEVEL, CLASS och SSIL (Ibid, 2019).

Tabell 6 redovisar frekvenser för felmod för en säkerhetsfunktion för olika SIL-klasser (Sodré & James, 2023)

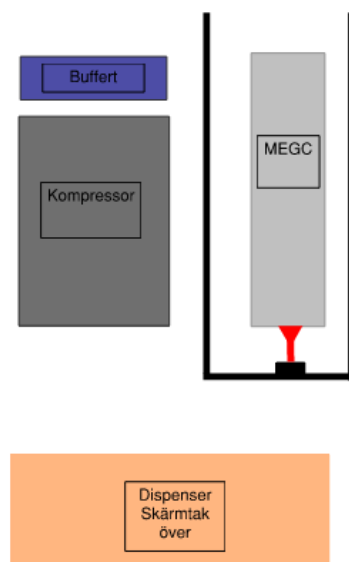
Tabell 6 frekvenser för farlig felmod för en säkerhetsfunktion (Sodré & James, 2023)

| SIL-klass | Sannolikhet för felfunktion /h  |
|-----------|---------------------------------|
| Nivå 4    | $\geq 10^{-5}$ till $< 10^{-4}$ |
| Nivå 3    | $\geq 10^{-4}$ till $< 10^{-3}$ |
| Nivå 2    | $\geq 10^{-3}$ till $< 10^{-2}$ |
| Nivå 1    | $\geq 10^{-2}$ till $< 10^{-1}$ |

För detektionssystem som utgörs som gas- och branddetektion ställs krav på att detektionssystemet ska uppnå en SIL klassning på SIL 2. Det betyder att systemet måste uppfylla en maximal sannolikhet för felfunktion på  $1 \times 10^{-2}/h$  (Groth et al. , 2012, s. 36).

### 4.3 Systemets utformning

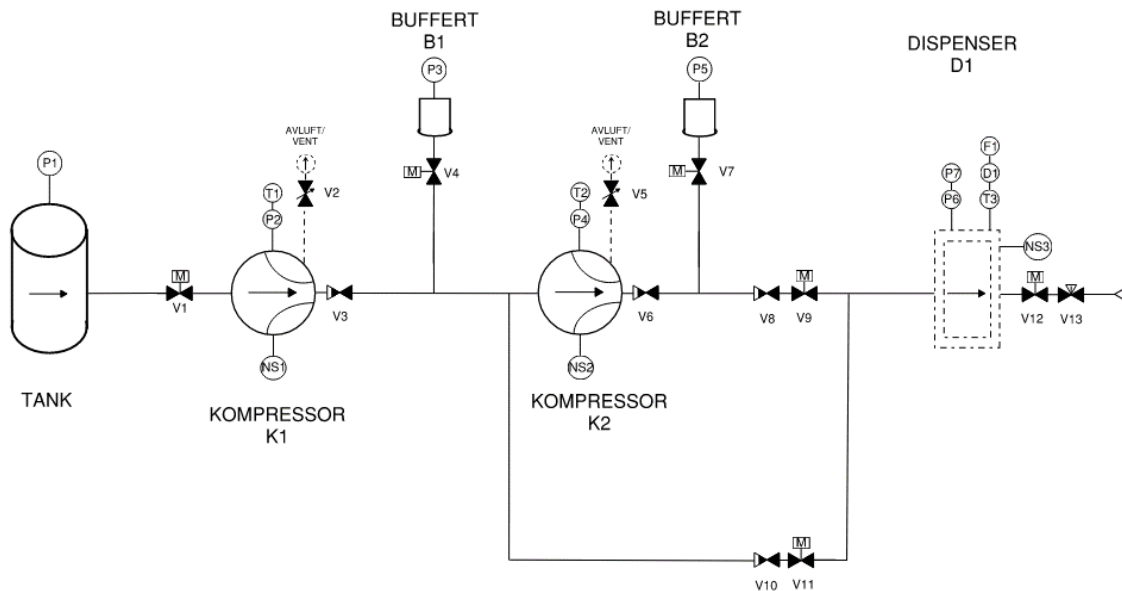
Systemet består av fyra huvuddelar, tank (MEGC), kompressor, buffert och dispenser. Vätgas flödar från MEGC till kompressorn där gasen komprimeras till ett leverenstryck som motsvarar 350 bar respektive 700 bar beroende på vilken typ av fordon som ska tankas. Då leverenstrycket ska motsvara 700 bar krävs det ett tryck på cirka 900 bar för att uppnå korrekt tryck vid dispenser. Den komprimerade gasen flödar till en buffert där gasen lagras i rätt tryck och temperatur. När ett fordon ska tanka flödar gasen till dispensern där den sedan överförs till fordonet. Figur 4 illustrerar utformningen av typanläggningen som analyseras.



Figur 4 skiss på utformning av typanläggning

På grund av de risker som medförs vid hantering av vätgas ställs det höga krav på komponenterna i systemet. Utöver säkerhetsrisker för själva hanteringen av vätgas påverkas anläggningen av utemiljön. Temperaturskillnader, vibrationer och materialbeständighet är exempel på faktorer som måste tas i beaktning vid val av komponenter och material.

I Figur 5 flödesschema för typanläggning, redovisas flödet för processen och ger en överblick över hur systemet är uppbyggt. Aktuell flödesschema är för det normala driftläget, ventilers läge varierar beroende på driftläge. Öppna ventiler markeras genom att vara vita medan stängda ventiler är svarta. De olika driftlägena beskrivs i kapitel 4.5.



Figur 5 flödesschema för typanläggning i det normala driftläget

Tabell 7 förklaring av komponenter inom flödesschema

| Beteckning | Förklaring                         |
|------------|------------------------------------|
| (P)        | Tryckvakt                          |
| (T)        | Temperaturvakt                     |
| (NS)       | Nödstopp                           |
| (D)        | Densitetsmätare                    |
| (F)        | Flödesmätare                       |
| ▲          | Läckflödesventilventil             |
| (M)        | Motormanövrerad ventil             |
| ▲          | Säkerhetsventil, avblåsningsventil |
| ▲          | Backventil                         |

#### 4.3.1 Tekniska system

Vätgasen levereras eller tillverkas på plats och förvaras sedan i en tank på anläggningsområdet. För detta arbete utgörs tanken av en MEGC, Multiple element gas container. En MEGC är en containerram med ett antal liggandes eller ståendes tryckkärlstuber monterade inuti. Containerens tryckkärl fylls med vätgas och fraktas sedan på exempelvis en lastbil till vätgastankstationen där den kopplas in direkt på systemet. Kopplingen till systemet sker via en slang. Vätgastanken ska avskiljas fysiskt samt ha påkörningsskydd. Beroende på omgivning och miljö kan avskiljningen variera.

Vätgasen inom systemet följer följande processteg från MEGC till fordon, se Figur 6.



Figur 6 processteg för vätgasen från tanken till fordon.

Från MEGC:n flödar vätgasen in till en **Kompressor**. Syftet är att komprimera gasen ytterligare så att fordon sedan kan bruka den. Kompressorutrymmet ska vara ventilerad, ventilationstekniskt kan utrymmet ventileras naturligt eller mekaniskt. Kompressorn utrustas med detektion som detekterar tryck. Beroende på vilken typ av fordon som ska tankas med vätgas krävs det olika höga tryck. Trycket för personbilar eller lastbilar och bussar kan skilja sig åt beroende på fordonets fabrikat. Vissa fabrikat av tyngre fordon kan tankas med ett lägre tryck på vätgasen. Genom att installera två kompressorer komprimeras vätgasen av den första kompressorn till ett gynnsamt tryck för tyngre fordon. Den redan komprimerade vätgasen komprimeras ytterligare genom den andra kompressorn och uppnår ett högre tryck som nyttjas av personbilar. Kompressor ska ha säkerhetsfunktioner som avbryter kompression vid detekterade avvikelser från kontroll- och acceptansnivåer. Exempel på funktioner som bevakas enligt H<sub>2</sub>-TSA är: gastryck vid in- och utlopp, oljetryck, temperatur på gas, olja och kylvätska (Energigas Sverige, 2022). Då ett fordon tankas kan kaskadtankning förekomma. Kaskadtankning innebär att fordonet först tankas med det lägre trycket och sedan byter till det högre trycket under tankningsprocessen. Syftet med funktionen är att minimera de förluster som förekommer vid påfyllnad av högre tryck. Energin som brukats för att komprimera gasen till 700 bars leverenstryck används på ett ineffektivt sätt vid påfyllnad av en mer eller mindre tom fordonstank.

Den komprimerade gasen lagras i en **buffert**. I bufferten är vätgasen redo för att levereras till fordonet via en dispenser.

**Dispenser** är sista steget i anläggningen där fordon tankas med vätgas. Dispenser utrustas med flertalet mätinstrument. Dels för att upprätta en säker tankning, dels för att debitera mängden vätgas som kunden tankar. Flödes hastighet, densitet, tryck och temperatur är faktorer som detekteras. Densitet mäts för att säkerställa kvaliteten på vätgasen, vid avvikande densitet ska tankning avbrytas. Flödes hastighet detekteras för att debitera fordonsägaren med rätt mängd. Dispenser ska vara utrustad med minst två tryckmätare för att säkerställa rätt leveranstryck. Vätgas ska ha en temperatur på mellan  $-40^{\circ}\text{C} < T^{\circ}\text{C} < 85^{\circ}\text{C}$  vid leverans till fordon.

Analysen bygger på följande processteg. Stegen är byggda på antaganden och stämmer eventuellt inte helt överens med verkligheten. Antaganden baseras på anläggningens utformning samt tankningsprocess för fossildrivna fordon.

Processtegen vid tankning är följande:

1. Kund debiterar för att tanka och systemet går in i tankläge.
2. Systemet öppnar ventiler fram till dispenser och rätt tryck verifieras.
3. Ventil mot pistolventil öppnas.
4. Munstycket kopplas mot fordon och kunden öppnar pistolventilen.
5. Tryckvakter på dispenser läser av så trycket förblir konstant under hela tankningsprocessen.
6. När tankningen är fullbordad stänger systemet samtliga ventiler och återgår till det normala driftläget.

#### 4.3.2 Detektion

Detektion används för att indikera om vätgasen i systemet avviker från det definierade grundläget. En tidig detektion innebär att avvikelserna kan åtgärdas i ett tidigare skede och eventuell olycka kan motarbetas. Det är svårt att detektera mindre läckage av vätgas, vilket kan bli ett problem om exempelvis väteförspredning bidrar till att större läckage uppstår. Sannolikheten för läckage att detekteras och isoleras uppskattas till 90% (LaChance, u.å., s. 4). Vilket gör detektionssystemet till ett av det mest betydelsefulla barriärerna för systemet.

Kompressorn är placerad inomhus vilket begränsar volymen som detektorn ska verka över. Den begränsande volymen förbättrar förutsättningarna för att detektera ett läckage i anslutning till kompressorn. Övriga delar av systemet är lokaliserade utomhus vilket kräver alternativa detektionslösningar, exempelvis ljuddetektering. Antalet detektorer beror på anläggningens utformning och design. Utöver detektorer används tryckvaktens funktion för att detektera läckage genom avvikelser inom systemet.

#### 4.3.3 Ventiler

Ventil är en komponent som kontrollerar, reglerar eller dirigerar flödet i ett system (Jordan, 2022, s. 108). Det flesta ventiler kan kategoriseras under tre typer: manuella, aktiverande och automatiska ventiler.

**Avstängningsventiler** som installeras på systemet ska ha manuell – och/eller automatisk manövrering. Handmanövrerade ventiler kräver att en person är fysiskt på plats för att öppna eller stänga. För anläggningen förekommer det manuella avstängningsventiler på samtliga in och utloppsledningar för systemets komponenter.

Automatiska styrda ventiler öppnar eller stänger då en viss referensnivå uppfyllts eller att ett visst driftläge ska infinna sig. En viss referensnivå kan exempelvis innebära ett visst tryck eller flöde detekteras och där styrenheten reglerar ventilen för att undvika säkerhetsproblem. Den automatiska funktionen ska stängas vid aktivering av nödstopp samt vid tappad signal från strömkälla och kontrollcenter. Avstängningsventiler ska finnas på ingående samt utgående ledning från kompressor samt för varje tryckkärl. Avstängningsventil ska vara tät i båda riktningarna samt vara skyddad mot brand. Ventilen ska vara lätt att manövrera och det ska tydligt framstå om den är öppen eller stängd (Energigas Sverige, 2022).

##### 4.3.3.1 Olika typer av ventiler som förekommer inom vätgashantering

Följande ventiler är olika sorters ventiler som kan användas inom systemet. Ventilerna beskrivs överskådligt för att bilda en uppfattning över hur flödet regleras.

**Läckflödesventil:** Ventil som tillåter flöden för givna tryck. Det maximala trycket som läckflödesventilen tillåter benämns som toleransgräns. Toleransgränsen bör vara maximalt 10% över det maximala leverenstrycket enligt H<sub>2</sub>-TSA. Ventilens syfte är att skydda fordonet mot för höga leverenstryck. Läckflödesventil tillsammans med ytterligare två normalt stängda ventiler säkerställer att fordonet uppnår tillåtet fyllnadstryck. Följande ventiler anses lämpliga i kombination med läckflödesventil (Ibid, 2022).

- **Magnetventil (solenoid)** används i kombination med läckflödesventil så att det maximala leverenstrycket till fordonet inte överskrider. Magnetventilen är stängd i normalt läge och öppnas via kontrollfunktion. Magnetventilen består av en spole, hylsa och kolv. När spolen aktiveras bildas ett magnetflöde vilket flyttar kolven och då öppnar ventilen. Magnetventiler är vanliga i sammanhang där flödeskontroll är nödvändigt (Burket, 2022). För detta arbete antas magnetventiler vara i kombination med läckflödesventilen

- **Kulventil** används i kombination med läckflödesventil så att det maximala leverenstrycket till fordonet inte överskrids. Kulventilen är stängd i normalt läge och öppnas via kontrollfunktion. Kulventil består av en genomborrad kula som roterar i kanalen på ventilen. Då ventilen är öppen bildar det genomborrade hålet en öppning genom kanalen och när ventilen stängs roterar kulan, vilket stänger kanalen då den genomborrade kanalen ställs vinkelrät mot kanalen. Kulventiler förekommer som manuella och automatiska.
- **Fjärilventil** liknar designen av en kulventil där skillnaden är att en bricka roterar i stället för en kula. Ventilen uppfyller samma funktion som för kulventilen
- **Fjäderstängande don** används i kombination med läckflödesventil så att det maximala leverenstrycket till fordonet inte överskrids. I ventilen sitter en fjäder som kan motstå ett visst tryck. När trycket överskrids trycks fjädern ihop. Fjäderstängande don är stängd i normalt läge och öppnas vid uppnått definierat tryck.

**Pistolventil** är den sista ventilen i systemet och kopplas samman med fordonet som ska tanka. Pistolventilen liknar det handtag som finns på befintliga tankstationer med fossila bränslen. Där gröna handtag är bensin och svarta är diesel. Handtaget för vätgastankstationer är utrustad med ett antal komponenter. Komponenternas syfte är dels för en ökad säkerhet med även för en smidigare tankupplevelse. Trycke med låsning används för att påbörja tankningen och där låsningen gör att trycket inte behöver hållas intryckt manuellt. När fordonet är fulltankat släpper låset och ventilen stängs. Ventilens öppning är utrustad med dels IR-kommunikation, dels stötskydd i form av en ”muff” i plast (WEH GmbH Gas Technology, 2021).

**Dragbrotsventil** ska finnas på utloppsledning från dispenser med syfte att minimera risk för olycka om ett fordon kör iväg med slang kopplad till fordonet. Dragbrotsventil bör även vara installerad på tank där påfyllnad sker externt (Ibid , 2022).

**Backventil** ska finnas på utloppsledning från kompressor och buffert. Backventilens syfte är att begränsa flödet till att endast gå i en bestämd riktning. Riktningen begränsas av att ventiler täpper till mekaniskt vid oönskad riktning på flödet.

#### 4.3.4 Övrig skyddsbarriär

**Fysisk avskiljning:** Förvaring av vätgas i form av tankar ska avskiljas från omkringliggande byggnader för exempelvis att minimera risken att tanken ska exponeras av en omgivande brand (Energigas Sverige, 2022, s. 26).. Avskiljningen bör vara 1.5 gånger högre än omgivande byggnad (Ibid, 2022, s. 26).

**Påkörningsskydd:** För dispenser är det fysiska påkörningsskyddet en plattform som dispensern står på. Plattformen utgörs ofta av ett betongfundament som är 10 cm högt (MSB, 2020, s. 15). Påkörningsskyddet är nödvändigt för att motverka risken att systemet skadas av att bli påkörd av fordon som ska tanka.

Kompressor och tank bör skyddas genom placering av påkörningsskydd. Påkörningsskydd kan utformas på liknande sätt som för dispenser men om trafik och hastighet bedöms vara lägre kan större betongelement vara tillräckligt (Ibid, 2020, s.15). Syftet med påkörningsskydd är att reducera skadorna som kan uppstå vid en kollision. Genom att skilja av eller placera robusta föremål framför skyddsobjektet kan syftet upprätthållas. Exempelvis stora stenar kan användas som påkörningsskydd.

**Nödstopp:** Vid en nödsituation krävs det att systemet kan stängas av och tankning avbrytas. Genom att installera nödstopp på dispenser och kompressor reduceras konsekvenser vid ett upptäckt fel. Vid aktiverat nödstopp ska gasflödet snabbt stängas av. Ventiler i systemet aktiveras och stänger flödet mellan det olika delarna (MSB, 2020, s. 13). Nödstopp placerat på kompressor antas endast aktiveras

av personal vid underhåll eller service. Vid aktiverat nödstopp för dispenser återställas systemet och tas i bruk efter att kontrollcenter eller personal på plats startat om systemet.

**Organisatoriska åtgärder:** Vid uppförande av en vätgastankstation ställs det höga krav för att minimera risken att en olycka ska förekomma. När stationen blivit besiktad och redo för användning krävs det en god framförhållning med driftkontroller, service och underhåll. Genom att planera återkommande förebyggande underhåll minimerar risken för oförutsägbara avbrott.

Minimera risken för mänskliga fel kan göras genom kontinuerliga utbildningar för service- och underhållspersonal. Utveckling av teknik och underhållsmetoder är något som bör eftersträvas för en säkrare arbetsplats. Men för att det ska vara möjligt krävs det dokumentation och utvärdering av tidigare service och underhåll. Med hjälp av dokumentationen reduceras tiden för att återkoppla vad orsaken kan vara för ett upprepande fel.

**Kontrollcenter:** Samtliga vätgasanläggningar antas övervakas av ett kontrollcenter som kan fjärrstyra systemets funktion. Den bemannade stationens kapacitet antas vara tillräcklig för att avbryta och starta om anläggningen vid problem för de olika driftlägena. Vid ett identifierat problem larmas kontrollcentret och dess bemanning, oavsett om avbrott i systemet redan genomförts eller inte. Vätgasanläggningarna antas vara i drift 24 timmar om dygnet vilket ställer krav på att kontrollcenter alltid är bemannat.

**Statisk elektricitet:** På grund av att vätgas har en låg antändningsenergi ska anläggningen skyddas mot statisk elektricitet. Potentialskillnaden som kan uppstå av en statisk uppladdning är tillräcklig för att antända väte i rätt koncentration. Delar av anläggningen som är potentialutjämnande ska vara jordade (Energigas Sverige, 2022, s. 24).

**Avblåsningsledning** avlägsnar väte från kompressorn genom att en säkerhetsventil öppnas vid för höga tryck. Ventilen är mekanisk där exempelvis en fjäder i ett fjäderstängande don trycks ihop och öppnar vid för högt tryck. Ledningen ska ha kapacitet för att släppa ut gasen för hela systemet. Avblåsningsledningen antas släppa ut gasen på ett säkert sätt och ett behörigt avstånd.

#### 4.4 Antaganden för systemet

För att få en helhetsbild av systemet och dess funktioner har ett antal antaganden gjorts gällande logiken och utformning.

Systemets komponenter antas kommunicera med varandra samt med ett externt kontrollcenter. Vid detektion av kritiska förändringar stänger det automatiska ventilerna samt avbryter aktuellt driftläges funktion. Syftet med att avbryta aktuellt driftläge är att förhindra en kritisk förändring som kan påverka risken för ökad konsekvensnivå. Genom kommunikation mellan detektorer och ventiler regleras flödet genom systemet på ett effektivt sätt. Då det normala driftläget infinner sig är samtliga ventiler stängda och förhindrar flödet genom systemet.

Tryckvakt P3 och P5, tryckvakt vid respektive buffert, ger godkänd signal när påfyllnadsläget ska tas i drift. Då trycket sjunker till miniminivå detekteras P3 eller P5 och indikerar att kompressor ska starta. Aktuella ventiler öppnas för att få ett flöde genom systemet. Det är även tryckvakt P3 och P5 som anger när kompressorn ska avsluta påfyllnadsläget.

Handmanövrerade ventiler antas endast regleras vid underhåll eller service av personal. Där av kommer dess felmoder inte tas i beaktning för FMEA:n.

Vid jämförelse med en traditionell bensinmack flödar bensinen vid öppning av pistolventil utan att "pipan" är i kontakt med tanken. Om liknande funktion applicerats på en vätgasstation kan konsekvenserna bli förödande eftersom vätgas då flödar direkt ut i atmosfären. Ett sådant flöde jämförs med ett fullständigt läckage. För att motverka ett sådant förlopp styrs flödet till fordonet av dispensers tryckvakter och ventiler. Ytterligare funktion som utförs automatiskt inför tankning är täthetskontroll, syftet är att kontrollera så slangledningen är tät. Om kontrollen underkänds kan exempelvis ett läckage uppstått på slangen eller att pistolventil inte är kopplad rätt mot fordonet.

#### 4.5 Systemets driftlägen

Analysen grundar sig i att systemet har tre driftlägen. Det första driftläget är normalt driftläge där systemet står i stand-by, vilket betyder att kompressor och dispenser inte utför något arbete. Det andra driftläget körs då ett fordon tankar. Vid tankläget antas kompressorn inte utföra något arbete medan dispenser brukas. Det tredje och sista driftläget är påfyllnadsläget. Efter att ett fordon tankat har trycket i bufferten sjunkit. Kompressorn startar för att tillsätta vätgas och öka trycket i bufferten. Detektion av flöde, densitet, temperatur och tryck är alltid aktiv oavsett vilket driftläge som är i drift. Följande avsnitt beskriver mer ingående hur komponenterna i systemet reagerar beroende på driftläge. Tabell 8 beskriver ventilers position för de olika driftlägena.

##### 4.5.1 Normalt driftläge

Vid normalt driftläge står systemet i stand-by. Ventiler är stängda för att förhindra flöde genom systemet. Kompressor komprimerar ingen gas och dispenser förser inte fordon med vätgas under normalt driftläge.

##### 4.5.2 Tankläge

Vid tankläge förser ett fordon med vätgas via dispenser. Ventiler fram till buffert hålls stängda medan ventiler mellan buffert och dispenser öppnas. Då ventiler öppnas trycksätts systemet till givet leverenstryck. Munstycket kopplas med fordonet och pistolventilen öppnas, trycket förblir konstant under hela processen. Tryckvakterna på dispensern verifierar att trycket är konstant och att fordonet tankar. Om trycket inte förblir konstant under tankläget har ett eventuellt läckage uppstått, tryckvakter ger då signal till ventiler att stänga och tankläget avbryts.

Kompressor komprimerar ingen gas då buffert antas ha tillräcklig kapacitet för att tanka ett flertal fordon innan påfyllnadsläget startar.

##### 4.5.3 Påfyllnadsläge

Efter att ett fordon har tankat och lämnat anläggningen mäts trycket i buffert. Då trycket är under systemets referenstryck påbörjas påfyllning av vätgas i systemet. Kompressorn förser med vätgas från MEGC och komprimerar gasen till systemets buffert. Ventiler öppnas för att reglera flödet från MEGC via kompressor till buffert. Ventiler mot dispenser hålls stängda.

#### 4.5.4 Översikt ventilers läge

Tabell 8 presenterar samtliga ventilers tillstånd beroende av driftläge. Ventilens numrering refererar till numrering som förekommer i flödesschemat, se Figur 5.

Öppen - Ventil definieras som öppen, vätgas flödar genom ventil.

Stängd - Ventil definieras som stängd, vätgas flödar ej genom ventil.

Tabell 8 position för ventiler vid olika driftlägen

| Basläge                | Normalt driftläge | Tankläge | Påfyllnadsläge |
|------------------------|-------------------|----------|----------------|
| V1 - Magnetventil      | Stängd            | Stängd   | Öppen          |
| V2 - Backventil        | Stängd            | Stängd   | Stängd         |
| V3 – Avluftsventil     | Stängd            | Stängd   | Stängd         |
| V4 – Magnetventil      | Stängd            | Öppen    | Öppen          |
| V5 - Backventil        | Stängd            | Stängd   | Stängd         |
| V6 - Avluftsventil     | Stängd            | Stängd   | Stängd         |
| V7 - Magnetventil      | Stängd            | Öppen    | Öppen          |
| V8 - Backventil        | Stängd            | Öppen    | Stängd         |
| V9 – Magnetventil      | Stängd            | Öppen    | Stängd         |
| V10 - Backventil       | Stängd            | Stängd   | Stängd         |
| V11 – Magnetventil     | Stängd            | Öppen    | Stängd         |
| V12 - Magnetventil     | Stängd            | Öppen    | Stängd         |
| V13 - Läckflödesventil | Stängd            | Öppen    | Stängd         |



## 5 QRA

I nedanstående kapitel beskrivs den kvantitativa riskanalys som genomförts utifrån metod och systembeskrivning. Analysen utgår från en FMEA där komponenters säkerhetsrisker identifierats. Utifrån underlaget från FMEA:n och systembeskrivningen modelleras QRA modulen i HyRAM+. Genom att lägga till och/eller ta bort komponenter från systemet analyseras risknivån utifrån skyddsnivån.

### 5.1 FMEA

Följande avsnitt beskriver förutsättning och antaganden som legat till grund för FMEA:ns resultat. Resultatet av FMEA:n bidrar till framtagandet av de designvariationer som beräknas i HyRAM+ och som jämförs mot arbetets typanläggning, se samtliga FMEA i bilaga B.

#### 5.1.1 Förutsättningar och antaganden

Analyserad funktion är en typanläggning av en vätgastankstation definierad utifrån Figur 5 flödesschema för typanläggning i det normala driftläget.

Genomförd FMEA är framtagen utifrån en mall skapad av Risk pilot. Mallen är utformad för större och mer komplexa system. Mallen har därför modifierats och anpassats till analysens sammanhang.

Följande antaganden har gjorts vid genomförd FMEA.

1. Aktiveringssignaler, uteblivna samt obefogade, gäller som felmod för samtliga aktiva objekt.
2. Då systemet är i ett farligt läge, antas det att vid något tillfälle, kommer en olycka ske.
3. Kombinationer av händelser som bidrar till olika konsekvenser antas inte inträffa.
4. Komponenterna i sig antas inte läcka vid genomförd FMEA, det är endast dess funktion som påverkar ett eventuellt läckage.

Genom att vara konservativ antas det värsta möjliga hända. Konservativt antagande är ett försiktigt antagande. För analysen antas exempelvis att ett övertryck från kompressorn leder till läckage, vilket inte säkert är utfallet då ett övertryck inträffar.

#### 5.1.2 Resultat

FMEA resulterar i att störst risk för läckage finns för dispenser i tankläge, kompressorn vid påfyllnadsläge och slang mot MEGC.

Läckage vid dispenser kan tänkas uppstå vid tankning. Dels för att vätgas flödar ut ur systemet, vilket betyder att ett läckage inte behöver uppstå från exempelvis skarvar. Dels för att människan är en avgörande faktor vid tankningsprocessen. Exempel på händelser som antas vara möjliga att leda till läckage är, ventiler inte ställer sig i korrekt läge, någon kör iväg med slangen kopplad till bilen eller att munstycket inte stänger korrekt.

Läckage vid kompressor antas ske då kompressorn är aktiv och komprimerar gas. Då gasen ska komprimeras till 900 bar ställs det höga krav på kompressorns kvalitet och på ett kontinuerligt underhåll. Därav bedöms kompressorn utgöra en hög risknivå. Risken är uppmärksammas av H<sub>2</sub>-TSA genom krav på flertalet säkerhetsanordningar kopplade till kompressorn. Exempelvis ett flertal instrument och säkerhetsventiler.

MEGC kopplas till systemet via en slang. Om det uppstår läckage vid koppling eller i slangens hölje kommer vätgas läcka tills manuell ventil stänger. I designvariation 6 adderas en automatisk ventil på MEGC för att sedan jämföra risknivån relativt grundläget.

Analysen resulterade i att det normala driftläget i sig inte har någon större påverkan på risknivån då samtliga ventiler är stängda. Dock antas uppkomsten av bristningar och rörbrott vara möjliga oavsett driftläge.

## 5.2 Systemdesign i HyRAM+

Utifrån kapitel 4, har analysens typanläggning designats och utformats. I följande avsnitt beskrivs hur typanläggningens grundläge har modellerats i HyRAM+.

### 5.2.1 Grundfallet

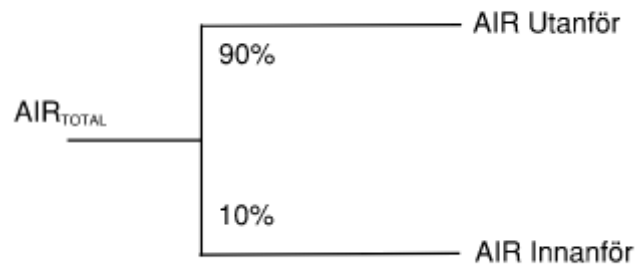
Detta avsnitt redovisar hur systemet är definierat och modellerat i HyRAM+ vid beräkning av grundfallet. Samtliga designvariationer är modellerade och redovisas i Bilaga 3.

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 32                         | 3                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Figur 7 indata för grundfallet

Beräknad individrisk för de olika delarna av anläggningen summeras genom följande händelsetråd, se Figur 8. Syftet med att räkna två individrisker är för att ta hänsyn till den fysiska avskiljningen som är placerad runt MEGC. Grenarna som delar händelsetrådet fördelas med andelarna 90% och 10%, vilket innebär att 90% av den totala individrisken antas bestå av

individrisken utanför avskiljningen. Andelen uppskattas utifrån antalet komponenter som definieras i HyRAM+. Komponenterna innanför avskiljningen summeras till 12 styck och komponenter utanför summeras till 96 styck. Den totala individrisken för grundfallet beräknas enligt Figur 8 och Ekvation 12. Andelen som förgrenar händelseträden för samtliga designvariationer baseras och beräknas utifrån samma antagande. Antagandet anses som konservativt eftersom samtliga komponenter utgör lika stor del av individrisken. Ett mer detaljerat tillvägagångssätt är att summera samtliga frekvenser för det totalt 108 komponenterna och utifrån det beräkna andelen för händelseträdets grenar.



Figur 8 händelsetråd för grundfallet

Ekvation 12

$$AIR_{TOTAL} = 0,90 \times AIR_{Utanför} + 0,1 \times AIR_{Innanför}$$

### 5.2.2 Rör

Rören som kopplar samman de olika delarna av systemet antas vara ovan mark och i direkt kontakt med det fria för grundfallet. Utifrån H<sub>2</sub>-TSA kan olika rördimensioner förekomma på vätgasanläggningar, för detta arbete uppskattas rören att ha en yttre diameter på 11 mm. Rörets hölje antas ha en diameter på 1,5 mm vilket gör att rörets inre diameter antas vara 8 mm. För verkliga anläggningar kan rör inom anläggningen ha olika dimensioner beroende på position. För detta arbete antas samtliga rör och slangar ha homogen dimension.

Mängden rör modelleras i HyRAM+ och är en av parametrarna vid beräkningarna. Enligt Ekvation 4 beräknas frekvensen för läckage baserat på antalet specifika komponenter, programmet beräknar varje meter rör som en enskild komponent. Exempelvis motsvarar 20 meter rör, 20 styck "rörkomponenter". Antalet rörmeter har uppskattats utifrån Figur 4. Bilden är kalibrerad utifrån ett standardmått på en 20 ft container som representerar MEGC. Rör och avstånd mellan övriga delar av anläggningen är uppskattade utifrån kalibreringen. Notera att Figur 4 skiss på utformning av typanläggning endast är en uppskattning på anläggningens utformning och är inte skalenlig.

Gasen trycksätts till två olika leverenstryck beroende på tankningssituation. För analysen antas ett så pass konservativt tryck som möjligt. Gasens tryck modelleras därför till 900 bar. Temperaturen på gasen ska vara inom intervallet  $-40^{\circ}\text{C} < T^{\circ}\text{C} < 85^{\circ}\text{C}$  enligt H<sub>2</sub>-TSA, för detta arbete används 20 °C. Den omgivande temperaturen antas vara 20 °C och det omgivande trycket antas vara atmosfärstryck, 101325 Pa.

Discharge coefficient antas till 1 baserat på att parametern ansätts till 1 i HyRAM+ - technical

reference manual (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 51). Antagandet är konservativt, där ett rimligare värde är runt 0,6 enligt SFPE handbook (Howard, 2002, s. 2-34).

### 5.2.3 Tankande fordon

Antalet tankningar per station och år antas utifrån det förinställda inställningarna i HyRAM+. Antalet tankningar som används är verifierade och godkända av NFPA (Groth, LaChance, & Harris, 2012, s. 29). Antalet tankningar per år beskrivs enligt följande:

- Antalet fordon som antas använda en specifik station uppskattas till 20 st.
- Varje fordon antas vara i drift 24 timmar om dygnet och i 250 dagar på ett år.
- Varje fordon förväntas tanka vart 12e timme.
- Totalt antalet tankningar uppskattas till 20 fordon \* 2 tankningar per dag \* 250 aktiva dagar = 10000 tankningar / år.

### 5.2.4 Flänsar och skarvar

Mängden flänsar och skarvar är beroende av hur anläggningen är utformad och designad. För detta arbete har antalet flänsar och skarvar uppskattats utifrån antalet ventiler, tryckkärl och kompressorer samt utifrån en uppskattad placering av rör.

### 5.2.5 Arbetande

Antalet arbetande på anläggningen modelleras utifrån det förinställda inställningarna i HyRAM+. Nio arbetande antas arbeta 2000 timmar per år och är placerade slumpmässigt över området. För detta arbete antas två personer sköta MEGC på anläggningen och sju personer sköter underhåll och service på resterande del av anläggningen.

## 5.3 Designvariationer

I detta avsnitt beskrivs det Designvariationer som görs för analysen. Designvariationerna som analyseras sammanfattas i tabell 4 och beskrivs sedan i detta avsnitt. Samtliga designvariationer beräknas på liknande tillvägagångssätt som grundläget om inget annat nämns.

Tabell 9 sammanfattning av designvariationer

| Scenarier         | Variation  |
|-------------------|--|
| Grundfallet       | -  |
| Designvariation 1 | Ökat anläggningsområde                             |
| Designvariation 2 | Buffert placeras inom samma utrymme som kompressor |
| Designvariation 3 | Samtliga rör är placerade under mark               |
| Designvariation 4 | Inga murar   |
| Designvariation 5 | Kompressor och buffert omgärdas av mur (separat)   |
| Designvariation 6 | Automatisk ventil på MEGC                          |
| Designvariation 7 | Ökat antal detektorer                              |
| Designvariation 8 | Antalet tankningar fördubblas                      |
| Designvariation 9 | 450 bars tryck i system                            |

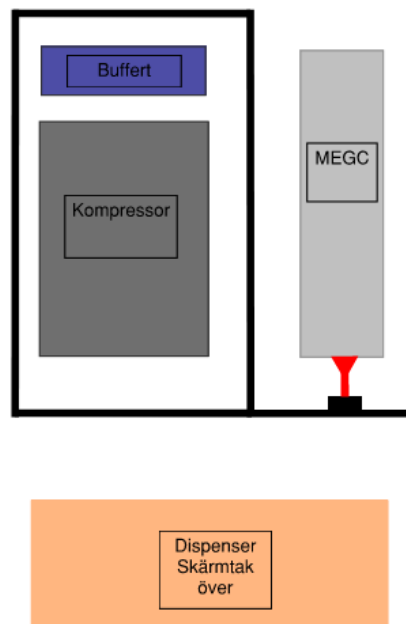
### Designvariation 1 – Ökat anläggningsområde

Arean som typanläggningen förfogar över samt avstånd mellan det olika komponenterna inom typanläggningen fördubblas. Då ytan ökar kan även skyddsavstånd mellan komponenterna öka. Ett

ökat avstånd mellan komponenterna följer en ökad rörlängd. Rörlängden antas fördubblas då anläggningens area fördubblas. Genom att fördubbla områdets längd och bevara dess bredd ökar arenan över anläggningen till det dubbla.

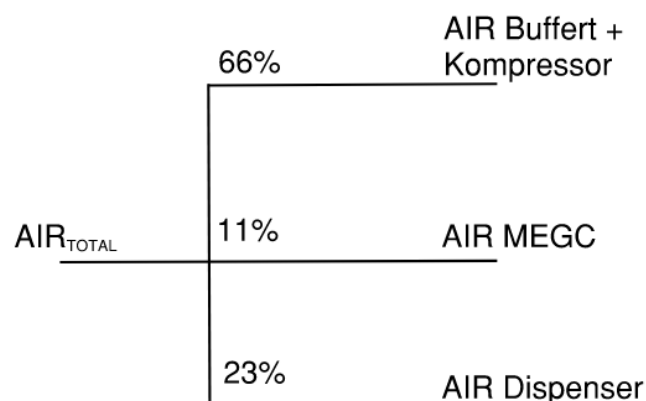
Designvariation 2 – Bufferten placeras inom samma fysiska avskiljning som kompressor

För grundfallet placeras buffert och kompressorutrymmet utan att skiljas av fysiskt från omgivningen. Genom att placera buffert med kompressorn inom samma fysiska avskiljning kan konsekvenser av eventuella läckage reduceras. Se anläggningens utformning för designvariation 2 i Figur 9. Beräkningar genomförs utifrån Figur 10 och Ekvation 13.



Figur 9 placering av fysisk avskiljning designvariation 2

Den totala individrisken för designvariation 2 beräknas med följande händelsetråd och ekvation. Andelen som föregener händelseträdet antas utifrån samma metod som för grundfallet, vilket är baserat på antalet komponenter för respektive del.



Figur 10 händelsetråd för designvariation 2

Ekvation 13

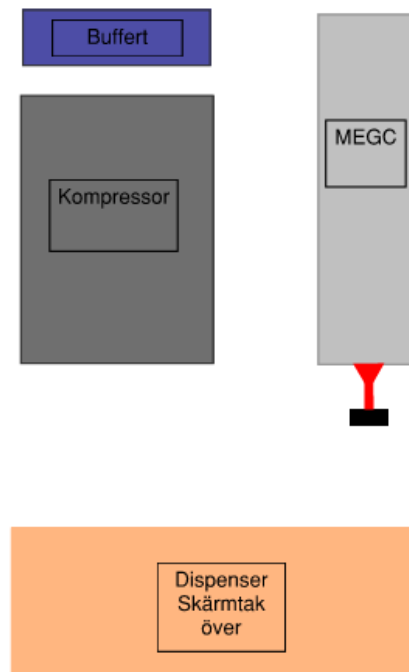
$$AIR_{TOTAL} = 0,66 \times AIR_{BUF \& KOMP} + 0,11 \times AIR_{MEGC} + 0,23 \times AIR_{DISPENSER}$$

### Designvariation 3 – Samtliga rör är placerade under mark

Genom att placera samtliga rör under marken antas konsekvenserna av ett läckage minimeras. Beräkningen görs genom att modellera anläggningens rörlängd till 0 meter.

### Designvariation 4 – Inga murar

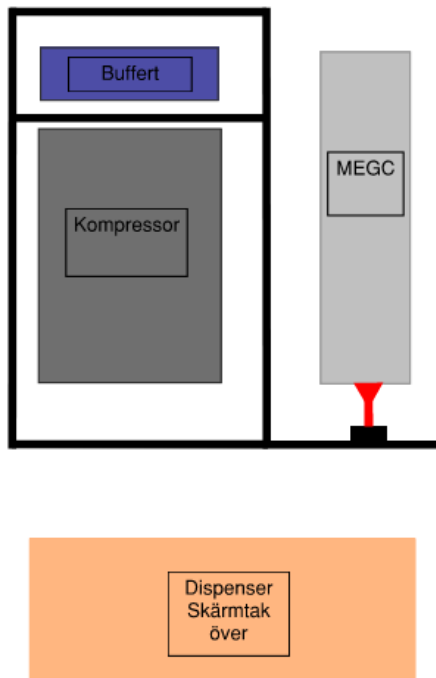
Inga murar förekommer på anläggningen. Den totala individrisken beräknas direkt i HyRAM+.



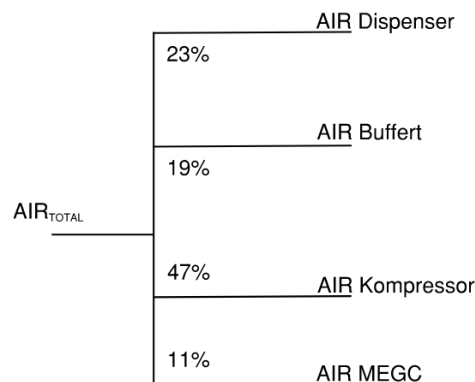
Figur 11 placering av fysisk avskiljning designvariation 4

### Designvariation 5 – Kompressor och buffert omgärdas av mur

Genom att omgärda kompressor och buffert med en mur kan konsekvenserna av ett eventuellt antänt läckage reduceras, se Figur 12. Beräkningen görs genom att förgrena buffert, kompressor, MEGC och dispenser till olika grenar i händelseträdet, se Figur 13 och Ekvation 14. Designvariationen genomförs för att analysera betydelsen av mängden fysiska avskiljningens. Skillnaden mellan designvariation 2 och 5 påverkar inte omgivningen ytterligare utan endast arbetande på anläggningen.



Figur 12 placering av fysisk avskiljning designvariation 5



Figur 13 händelsetråd för designvariation 5

Ekvation 14

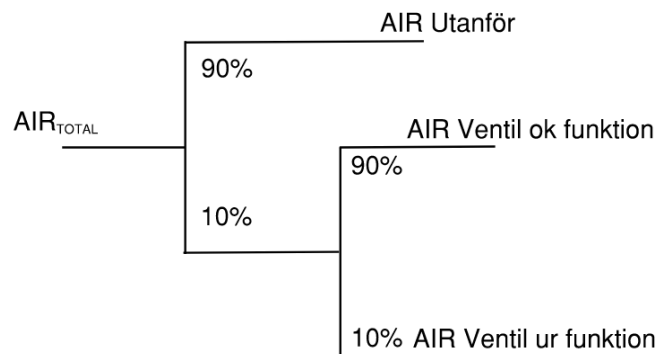
$$AIR_{TOTAL} = 0,23 \times AIR_{DISP} + 0,19 \times AIR_{BUF} + 0,47 \times AIR_{KOMP} + 0,11 \times AIR_{MEGC}$$

#### Designvariation 6 – Automatisk ventil på MEGC

Genomförd FMEA resulterade i att läckage på slang mellan MEGC och kompressor inte kan isoleras utan läckaget fortsätter och kan endast förhindras genom att en manuell ventil stänger. Genom att installera en automatisk ventil på MEGC kan läckaget detekteras och isoleras automatiskt.

Beräkningarna för denna designvariation görs dels genom HyRAM+ dels med handberäkningar. Ventilen som läggs till har en specifik placering med ett specifikt syfte, vilket inte HyRAM+ kan ta hänsyn till. Handberäkningarna räknas genom ytterligare gren i grundläggets händelsetråd, se Figur 14. Den ena grenen representerar då ventilen uppfyller sin funktion, vid detta fall antas risken vara noll. För den andra grenen är ventilen ur funktion med felmod utebliven stängning. Förgreningen delas upp med andelarna 90% att ventilen stänger mot 10% att ventilen misslyckas att stänga. Även

om sannolikheten för att ventilen ska fela är låg förekommer alltid osäkerheter. Sannolikheten för utebliven detektion och isolation för ett läckage antas till 10% (Groth, LaChance, & Harris, 2012, s. 36). Baserat på sannolikheten för utebliven förmåga att detektera och isolera, antas den automatiska ventilen ha samma sannolikhet för fel.



Figur 14 händelsetråd för designvariation 6

Ekvation 15

$$AIR_{TOTAL} = 0,9 \times AIR_{UTANFÖR} + 0,1 \times (0,9 \times AIR_{UR FUNKTION} + 0,1 \times AIR_{OK FUNKTION})$$

#### Designvariation 7 – Ökad antal detektorer

Genom att öka antalet detektorer minskar sannolikheten för att ett eventuellt läckage antändes. Genom att detektera och isolera ett läckage minskar risken för att läckaget antändes. Designvariationen görs genom att sänka sannolikheten för att ett läckage ska antända. Det är komplicerat att uppskatta hur mycket ett ökat antal detektorer påverkar sannolikheten för att ett läckage ska antända. För detta arbete antas sannolikheten för direkta och fördröjda antändningar reduceras med 25%, se Tabell 10. Ny sannolikhet för Antagandet av sannolikhet och reducerad uppkomst av antänt läckage diskuteras vidare i kapitel 8.1.4.

Tabell 10 ny sannolikhet för antändning

| Massflöde (kg/s) | Sannolikhet: Direkt antändning | Sannolikhet: Fördröjd antändning | Ny sannolikhet: Direkt antändning | Ny sannolikhet: Fördröjd antändning |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| <0,125           | 0,008                          | 0,004                            | 0,0060                            | 0,0030                              |
| 0,125 - 6,25     | 0,053                          | 0,027                            | 0,03975                           | 0,02025                             |
| >6,25            | 0,23                           | 0,12                             | 0,1725                            | 0,090                               |

#### Designvariation 8 – Antalet tankningar fördubblas

Om användandet av välgasdrivna fordon ökar förväntas även antalet tankningar öka. Genom att analysera individrisken för att antalet tankningar per år fördubblas, kan systemets tillförlitlighet diskuteras vidare.

#### Designvariation 9 – 450 bars tryck i systemet

Beroende på vilken typ av fordon som tankas kan trycket variera. För tankstationer som endast är avsedda för tyngre fordon antas trycket vara reducerat till 450 bar. Designvariation 9 genomförs för att analysera möjligheten av att bygga anläggningar som endast kan förse tyngre fordon med bränsle.



## 6 Fysikaliska samband

Beräkningar enligt QRA modulen resulterade i att jetflamma vara den största riskfaktorn för förväntat antal dödsfall per system-år (PLL). Baserat på resultatet kommer fenomenet jetflamma att beräknas för modulen fysikaliska samband.

Följande indata används vid beräkning av flamlängd och massflöde för jetflammar vid olika läckagestorlekar och tryck.

Tabell 11 indata för beräkning i HyRAM+

| Variabel                     | Värde                   | Enhet  |
|------------------------------|-------------------------|--------|
| Omgivande temperatur         | 293                     | Kelvin |
| Omgivande tryck              | 101,325                 | kPa    |
| Läckagets diameter           | 0,8:2,53:8              | mm     |
| Discharge coefficient, $C_D$ | 1                       | -      |
| Utsläpps vinkel              | 0                       | Grader |
| Fas                          | Gas                     | -      |
| Gastruck                     | 900 (450 <sup>2</sup> ) | Bar    |
| Gastemperatur                | 293                     | Kelvin |

- Den omgivande temperaturen och det omgivande trycket antas vara rumstemperatur samt atmosfärstryck, liknande antagande som görs för beräkningar i QRA modulen. Även gasen antas vara rumstempererad. Utöver grundläget där ett konservativt tryck på gasen antas till 900 bar, beräknas även ett tryck på 450 bar enligt designvariation 9.
- Läckagets diameter motsvarar det tre läckagestorlekarna som beräknas, 1%, 10% och 100% av rörets area.
- Discharge coefficient antas till 1 baserat på att parametern ansätts till 1 i HyRAM+ - technical reference manual (Ehrhart & Hecht, 2021, s. 51). Antagandet är konservativt, där ett rimligare värde är runt 0,6 enligt SFPE handbook (Howard, 2002, s. 2-34).

---

<sup>2</sup> Beräkningar görs även för designvariation 9 där trycket på gasen reducerats till 450 bar.



## 7 Resultat

I detta kapitel redovisas resultatet av den genomförda QRA:n och de fysikaliska sambanden.

### 7.1 Resultat QRA

Resultatet redovisas i följande tabeller.

Tabell 12 resultat QRA

| Scenario  | FAR <sup>3</sup> | Relativ risk mot grundläget |
|---|------------------|-----------------------------|
| Grundläget                                      | 0,6144           | 1                           |
| DV1– Fördubblat område                          | 0,6081           | 0,989721                    |
| DV2– Buffert och kompressor i samma utrymme     | 0,4764           | 0,775301                    |
| DV3 – Samtliga rör under mark                   | 0,6049           | 0,984475                    |
| DV4 – Inga murar                                | 0,8095           | 1,317449                    |
| DV5 – Mur runt kompressor och buffert (separat) | 0,1511           | 0,245867                    |
| DV6 – Automatisk ventil på MEGC                 | 0,5787           | 0,941823                    |
| DV7 – Ökat antalet detektorer                   | 0,4639           | 0,75494                     |
| DV8 – Fördubblat antal tankningar               | 0,6179           | 1,005639                    |
| DV9 – 450 bars tryck i systemet                 | 0,3643           | 0,59286                     |

Tabell 13 störst andel förväntat antal dödsfall per system-år för olika typer av antänt läckage

| Typ av läckage                    | Andel av förväntat antal dödsfall per system-år (PPL) |
|-----------------------------------|---|
| Jetflamma med 10% läckagestorlek  | 10%   |
| Jetflamma med 100% läckagestorlek | 80%   |
| Explosion med 100% läckagestorlek | 6%  |

### 7.2 Resultat fysikaliska samband

Resultatet av det fysikaliska beräkningarna redovisas i följande avsnitt.

Tabell 14 sammanställt resultat för grundläge och designvariation 9

| Läckage          | Sannolikhet för uppkomst av jetflamma per år | Massflöde (kg/s)      | Total emitted radiative power (W) | Synlig flamlängd (m) |
|------------------|--|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1% - Grundfall   | 0,080%                                       | $2,5 \times 10^{-2}$  | $1,2 \times 10^5$                 | 2,7 m                |
| 10% - Grundfall  | 0,530%                                       | $2,5 \times 10^{-1}$  | $2,1 \times 10^6$                 | 8,5 m                |
| 100% - Grundfall | 0,530%                                       | 2,6                   | $3,6 \times 10^7$                 | 27 m                 |
| 1% - DV9         | 0,080%                                       | $1,34 \times 10^{-2}$ | $5,84 \times 10^4$                | 2 m                  |
| 10% - DV9        | 0,530%                                       | $1,34 \times 10^{-1}$ | $1 \times 10^6$                   | 6,5 m                |
| 100% - DV9       | 0,530%                                       | 1,34                  | $1,72 \times 10^7$                | 20 m                 |

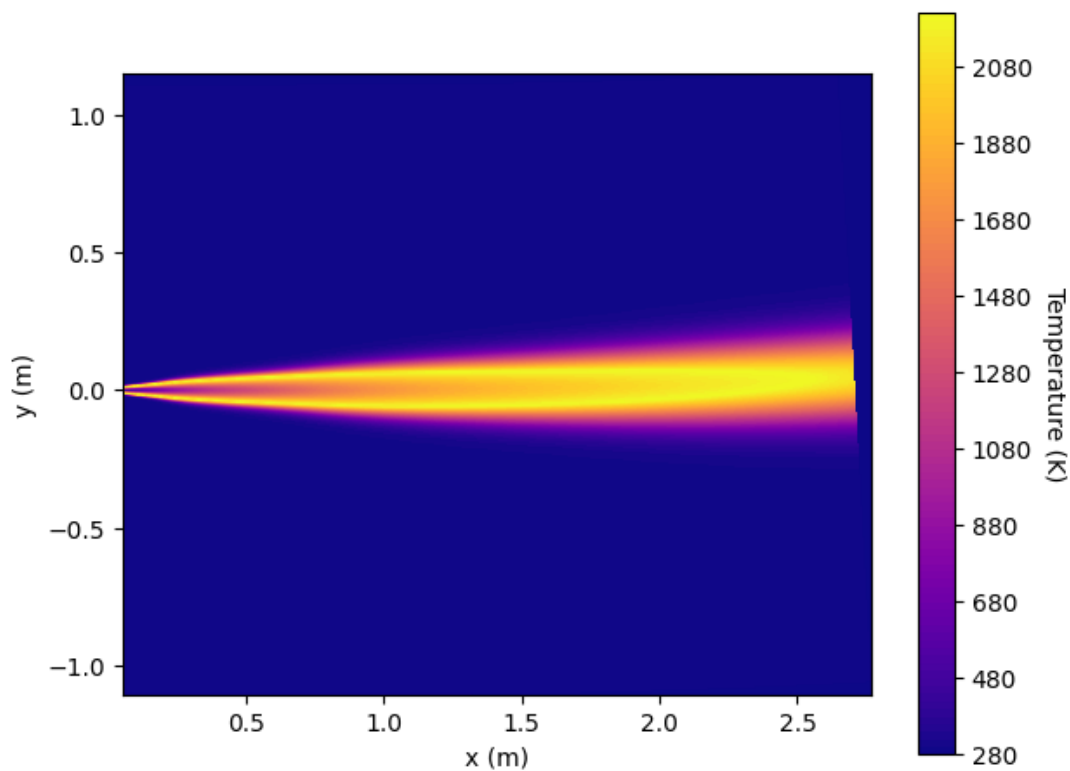
<sup>3</sup> FAR: Förväntat antal dödsfall per 100 miljoner timmar.

## 7.2.1 Grundläge

Tabell 15 resultat för grundläge vid beräknade jetflammar vid olika läckagestorlekar

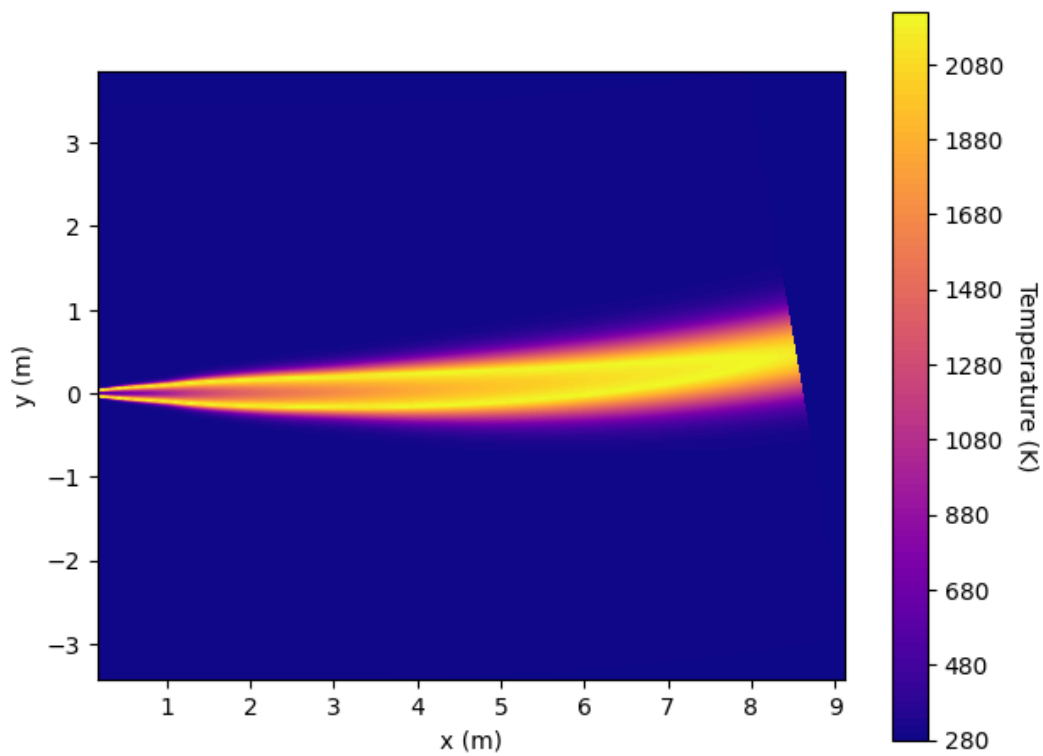
| Läckage | Sannolikhet för uppkomst av jetflamma per år | Medelvärde av antal event per år | Massflöde (kg/s)     | Total emitted radiative power (W) | Synlig flamlängd (m) |
|---------|--|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1%      | 0,080%                                       | 0,000023                         | $2,5 \times 10^{-2}$ | $1,2 \times 10^5$                 | 2,7 m                |
| 10%     | 0,530%                                       | 0,000088                         | $2,5 \times 10^{-1}$ | $2,1 \times 10^6$                 | 8,5 m                |
| 100%    | 0,530%                                       | 0,000075                         | 2,6                  | $3,6 \times 10^7$                 | 27 m                 |

### 7.2.1.1 1% läckage vid grundläget



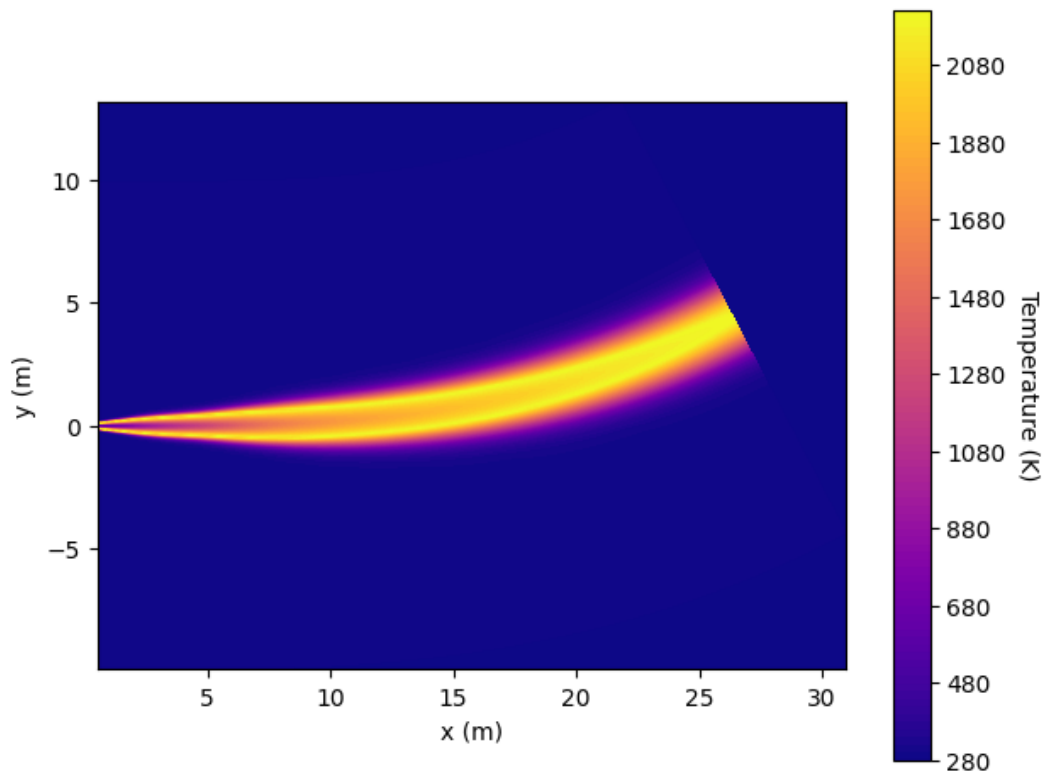
Figur 15 Grundläge: synlig flamlängd vid läckage på 1%

### 7.2.1.2 10% läckage vid grundläget



Figur 16 Grundläge: synlig flamlängd vid läckage på 10%

### 7.2.1.3 100% läckage vid grundfallet



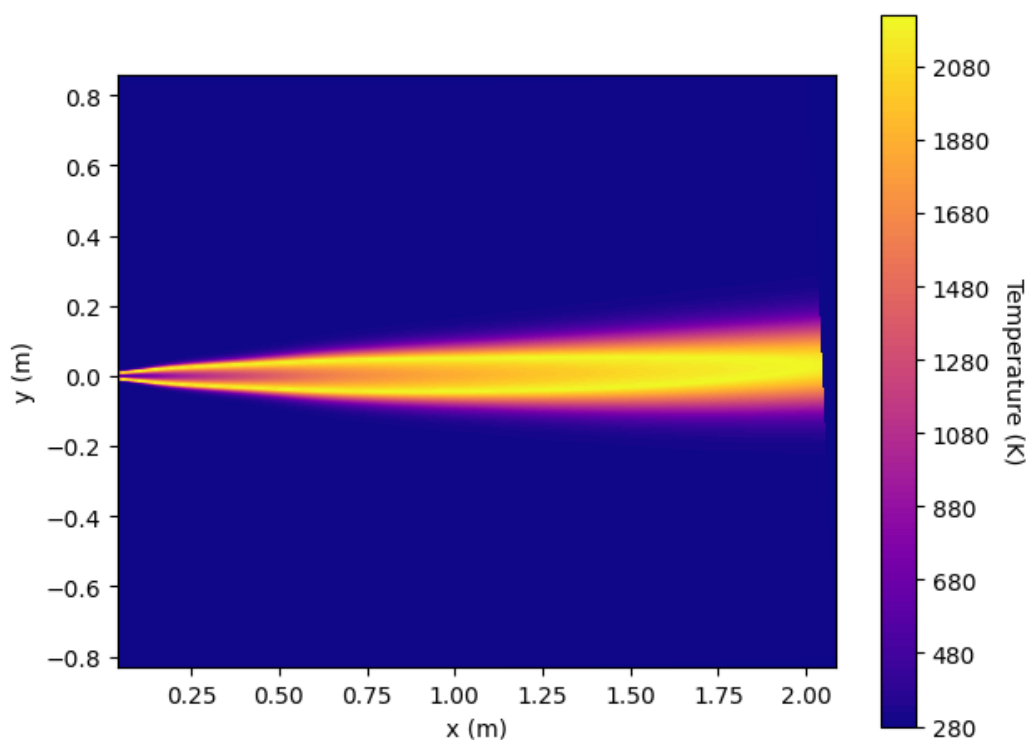
Figur 17 Grundfall: synlig flamlängd vid läckage på 100%

## 7.2.2 Designvariation 9 – 450 bars tryck i systemet

Tabell 16 resultat för designvariation 9 vid beräknade jetflammar vid olika läckagestorlekar

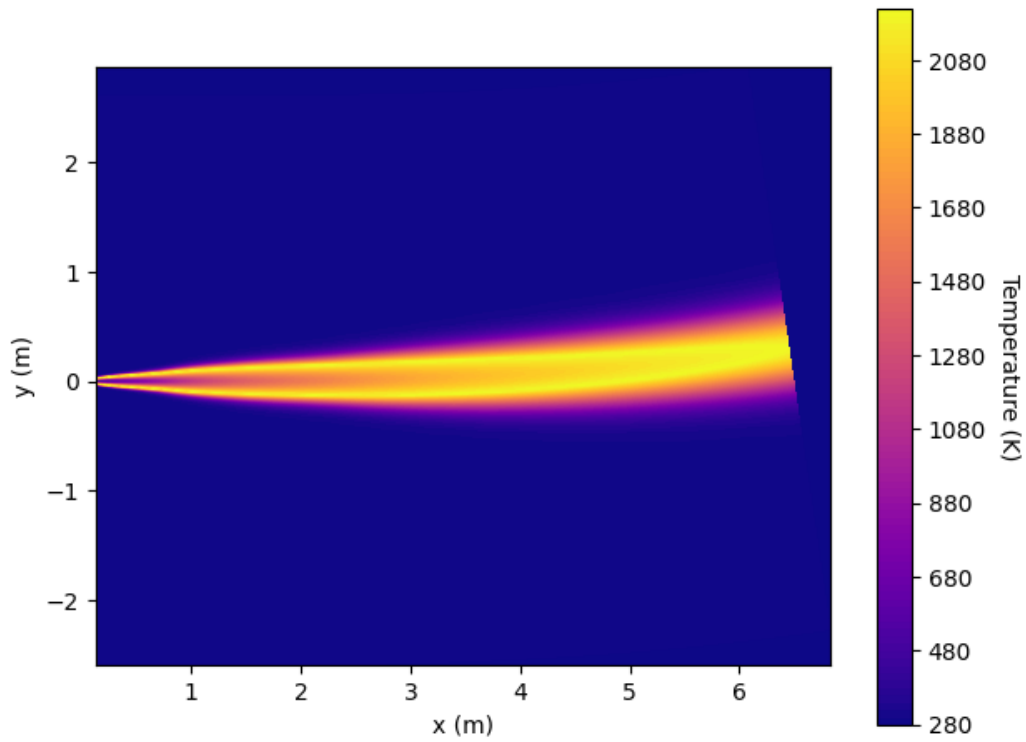
| Läckage | Massflöde (kg/s)      | Total emitted radiative power (W) | Synlig flamlängd (m) |
|---------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1%      | $1,34 \times 10^{-2}$ | $5,84 \times 10^4$                | 2 m                  |
| 10%     | $1,34 \times 10^{-1}$ | $1 \times 10^6$                   | 6,5 m                |
| 100%    | 1,34                  | $1,72 \times 10^7$                | 20 m                 |

### 7.2.2.1 1% läckage vid 450 bars tryck



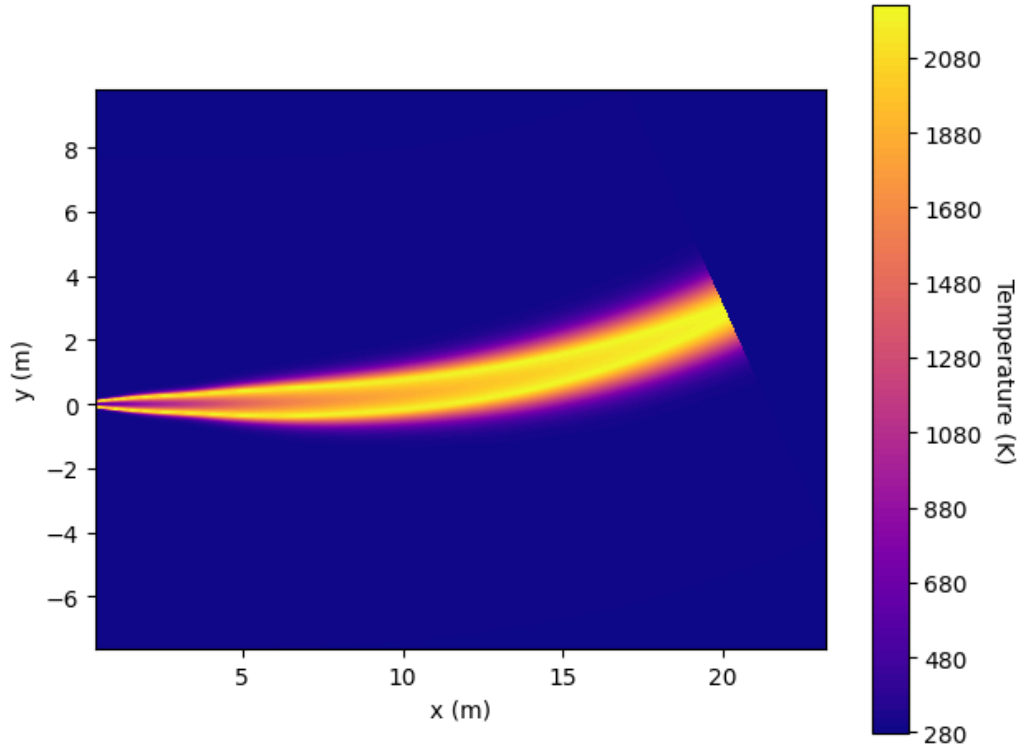
Figur 18 DV9: synlig flamlängd vid läckage på 1%

7.2.2.2 10% läckage vid 450 bars tryck



Figur 19 DV9: synlig flamlängd vid läckage på 10%

7.2.2.3 100% läckage vid 450 bars tryck



Figur 20 DV9: synlig flamlängd vid läckage på 100%





## 8 Analys och diskussion

I detta kapitel analyseras resultat och observationer från QRA:n och de fysikaliska sambanden. Kapitlet behandlar även olika åtgärdsförslag utifrån resultatet samt innehåller en diskussion kring betydelsen av systemets barriärer.

I följande avsnitt varvas författarnas egna åsikter med referenslitteratur som studerats under examensarbetet.

### 8.1 QRA

Det relativa riskerna resulterade i en kvot runt 1 för majoriteten av designvariationerna. Den marginella skillnaden mellan de olika designvariationerna har ingen direkt påverkan på individrisken. De designvariationer där fysiska objekt lades till eller togs bort gav en mer betydande effekt för den relativa risken. Genom att skilja av de olika komponenterna inom anläggningen minskar risken att ett eventuellt antänt läckage skadar personer eller egendom. Följande avsnitt diskuterar vidare hur de olika beräknade designvariationerna påverkar individrisk och eventuella konsekvenser.

#### 8.1.1 Riskbedömning

Att sänka en risk till noll är i praktiken inte möjligt. Risker definierar ett värde på det som skyddas, om där inte finns risker finns där inget av värde att skydda. Det vill säga en lägre risk medför ett mindre värde för funktionen som önskas. Lägre risker är en vinst för säkerheten men generellt ingen vinst ekonomiskt.

Arbetets syfte är att se hur risknivån påverkas av skyddsnivån. Vad som anses acceptabelt eller inte är inget som tas i beaktning. En alternativ metod för att verifiera en acceptabel nivå är exempelvis genom ALARP. Med hjälp av en riskmatris kan den lägsta acceptabla risknivån säkerställas.

#### 8.1.2 Designvariation 1

För den första designvariationen fördubblades anläggningens yta och avståndet mellan de olika delarna ökade. Jämfört med grundfallet resulterade den relativa risken endast i en marginell skillnad, däremot ger ett större skyddsavstånd bättre förutsättningar för en tankande person att undvika allvarliga skador från ett antänt läckage. För anläggningar inom bebyggelse och stadsdelar kan ytan vara en begränsande faktor vilket gör att det eventuellt inte är möjligt att anlägga vätgasstationen på en motsvarande större yta enligt designvariationen.

#### 8.1.3 Designvariation av fysisk avgränsning

Den fysiska avskiljningen är den mest betydande faktorn för individrisken. För designvariation 4 tas den fysiska avskiljningen runt MEGC bort, vilket resulterade i den högsta relativa risken av samtliga designvariationer, en relativ risk på cirka 1,32. Designvariationen bekräftar betydelsen av att avskilja MEGC med mur. Designvariation 2 och designvariation 5 ger ytterligare argument för betydelsen av att skilja av delar av anläggningen. Den relativa risken resulterade i en kvot under 1 vilket betyder att det ger en positiv inverkan på systemet och reducerar individrisken jämfört med grundfallet. Beräkningarna för fysisk avskiljning resulterar i att en lägre risknivå kan uppnås genom att öka skyddsnivån och skilja av kompressor, buffert och MEGC.

#### 8.1.4 Designvariation 7

För designvariation 7 ökar antalet detektorer för detektionssystemet. Beräkningsmetoden för denna designvariation görs genom att sänka sannolikheten för ett läckage. Samtliga sannolikheter för respektive massflöde reduceras med 25%. Beräkningarna resulterade i att även individrisken reducerades med cirka 25%. I dagsläget finns det krav på att detektionssystemet i sin helhet ska uppnå en SIL klass 2. Antalet detektorer anges inte vilket gör att någon form av uppskattning krävs.

För designvariationen antas två detektorer adderas vid kompressor, buffert och dispenser och en detektor adderas vid MEGC, vilket även adderas i HyRAM+ som instrument. Antagandet att dessa detektorer reducerar sannolikheten för att läckage antänds grundas i att sannolikheten för att läckage detekteras och isoleras antas öka. Att sannolikheten reduceras med 25% är endast en uppskattning av författaren. Syftet med designvariationen är att analysera hur ett förbättrat detektionssystem påverkar individrisken. Designvariationen resulterade i att ökad detektion och reducerad sannolikhet för att ett läckage antänds reducerar även risknivån. Slutsatsen dras utifrån att detektionen aktiverar och isolerar läckaget direkt då det uppstår, i praktiken kan det ske en fördröjning på sekunder innan läckage detekteras.

En reducerad sannolikhet för att ett läckage antänds utifrån att det detekterats och isolerats behöver inte innebära att antalet detektorer ökar. En reducerad sannolikhet kan innebära att det befintliga detektionssystemet förnyas, förbättrats och effektiviserats. Exempelvis kan detektionssystemets SIL klass ökas vilket medför en reducerad sannolikhet för felfunktion eller att dess kapacitet och känslighet förbättras. Med en känsligare detektion antas antalet falsklarm öka, förekomsten av falsklarm påverkar dock inte säkerhetsnivån negativt.

#### 8.1.5 Designvariation 9

Ett lägre tryck i systemet resulterade i en cirka halverad relativ risk jämfört med grundfallet. För anläggningar som är till för alla olika typer av vätgasdrivna fordon är denna designvariation ingen användbar lösning. Men för företag som endast använder tyngre fordon som exempelvis bussar eller lastbilar, kan ett lägre tryck i systemet vara ett alternativ för att reducera risknivån. Exempelvis åkerier, logistikcenter eller bussbolag som har egna vätgasstationer som endast är till för att tanka specifika typer av fordon som kan köra på ett lägre tryck.

#### 8.1.6 HyRAM+

Konsekvensberäkningsprogrammet HyRAM+ skapades med syfte att specificera risk- och brandrelaterade beräkningar för bland annat vätgas. Programmet är inte fullständigt utvecklat då exempelvis komponenter inom produktion av vätgas inte definierats. Då programmet inte är färdigutvecklat kan arbetets val av program ifrågasättas. Valet föll dels på att programmet är tillgängligt via grundarna, Sandia National Laboratories hemsida, vilket ger ett kvitto på programmets trovärdighet. Dels för att programmets beräkningsmoduler innefattar metoder för att svara på samtliga frågeställningar för detta arbete.

Utöver det riskmått som kan beräknas i HyRAM+ finns ytterligare och alternativa metoder som kan användas för att kvantifiera en risk. Exempelvis samhällsrisk som beskriver risken för personer inom anläggningens område och hur de påverkas av en olyckshändelse. Inom vätgasanläggningens område kan andra samhällsviktiga funktioner inkluderas, som exempelvis förskolor, bostadsområden eller butiker. Risken kan presenteras med en FN-kurva, som är metod för att visualisera sannolikheten för antalet dödsfall per år via ett diagram. FN-kurvan anger sannolikheten att antalet omkomna överstiger ett visst värde, vilket är användbart då risken måste understiga vissa acceptanskriterier. Syftet med examensarbetet är att jämföra risken för förändringar inom en typanläggning och begränsas till att inte konstatera vilka förändringar som anses vara acceptabla.

Problematiken med beräkningarna är att anläggningen inte kan designas i programmet. Det är endast komponenterna inom systemet som definieras och sedan räknar programmet på läckage för varje komponent. Det innebär att om systemet innehåller komponenter som är beroende av varandra kan inte programmet ta hänsyn till det. Exempelvis så är en implementerad säkerhetsventil endast en ny läckagekälla för programmet, ventilens syfte eller egenskap tas inte hänsyn till. Användaren måste på egen hand se till att säkerhetsåtgärdens funktion tas i beaktning. Det görs genom att ändra indata i

programmet eller genom kompletterande beräkningar. Kompletterande beräkningar kan vara från andra program eller genom handberäkningar. Det är viktigt att beräkningsmetoden som används tas i beaktning vid beslutsfattandet av rörda risker. För detta arbete valdes det att komplettera beräkningarna i HyRAM+ med handberäkningar genom händelseträdet. För att använda metoden krävs det viktade andelar för de olika grenarna. För detta arbete uppskattades de viktade andelarna utifrån antalet komponenter som definierats i HyRAM+. Andelarna uppskattas utifrån antagandet att samtliga komponenter har en lika stor sannolikhet för uppkomst av läckage, vilket är en förenkling av verkligheten. Samtliga komponenters frekvens vid olika läckagestorlekar finns fördefinierade i HyRAM+. Men då samtliga designvariationer beräknas med detta antagande anses inte resultatet påverkats märkvärt. En alternativ metod för att uppskatta de viktade andelarna för grenarna i händelseträdet är att använda en liknande beräkningsmetod men där frekvenserna för samtliga läckagestorlekar integreras för varje komponent. En metod som är betydligt mer tidskrävande.

#### 8.1.7 Underhållsarbete

Det är sen tidigare känt och uppenbart att utvärdering, dokumentation och lärande utav olycksscenarioer är viktigt för ett säkrare och effektivare arbete. Att ta lärdom av misstag och olyckshändelser är grundläggande för att förebygga liknande framtida olyckor från att hända igen (Hawswort et al., 2022, s. 284). Genom att dokumentera och dela med sig av misstag kan andra industrier och företag som tillverkar tankstationer ta lärdom och förhindra att liknande olyckor för deras medarbetare eller kunder. Som tidigare nämnt förväntas användningen av vätgas att öka, vilket ställer processen i en central position för en säker vätgashantering. Enligt designvariation 8 ökar risken minimalt vilket gör att typanläggnings system är designat för att klara en ökad användning.

Utöver att addera och reducera systemet på komponenter som ökar och sänker risknivån bör underhåll tas i beaktning för befintliga komponenter. Om underhåll och kontroller sker med ett mindre tidsintervall minskar intensiteten för fel. Vid kontroller och underhåll undersöks varje komponents tillstånd med syfte att säkerställa komponentens funktion. Om dessa kontroller görs med ett mindre tidsintervall kommer brister inom systemet upptäckas tidigare, exempel på brister kan vara sprickor eller en icke fungerande givare. Genom att minska intervallet med läckage minskar även risken för olyckor.

Som tidigare nämnt är det viktigt att införa rutiner och tidsplaner för underhåll. Förebyggande underhåll bör planeras så personal får den tiden de behöver för att utföra arbetet på ett säkert sätt och samtidigt göra stationen så tillgänglig som möjligt. Exempelvis genom att inte planera underhåll under rusningstid, vilket varken gynnar servicepersonal, kunder eller verksamheten. I det utkast av H<sub>2</sub>-TSA som författaren tagit del av beskrivs det hur underhåll ska dokumenteras och med vilket tidsintervall som det förväntas genomföras för de olika ingående komponenterna.

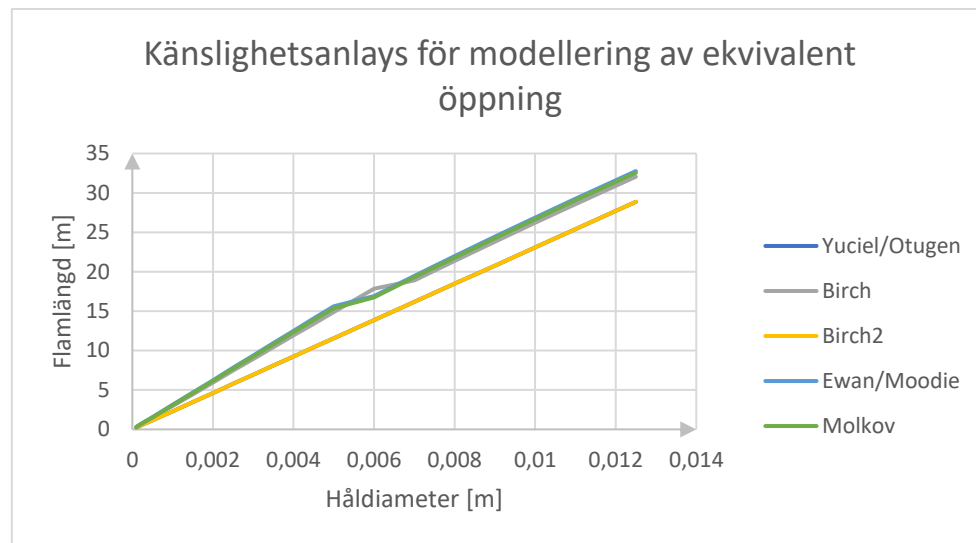
##### 8.1.7.1 Antal arbetande

Beräkningar i HyRAM+ tar hänsyn till antalet arbetare samt deras arbetstid på anläggningen under ett år. För detta examensarbete användes det förinställda inställningarna för totalt antal arbetande, nio personer som arbetar 2000 timmar per år. Det innebär att nio personer är heltidsanställda på anläggningen. Valet av att beräkna med det förinställda inställningarna baseras på ett konservativt antagande. Som motiveras med den osäkerhet som förekommer kring hur stor personalkapacitet som krävs för att upprätthålla en låg risknivå.

#### 8.1.8 Känslighetsanalys Notional nozzle

I HyRAM+ finns fem olika modeller för att modellera den ekvivalenta öppningen. Detta avsnitt avser att analysera hur de olika modellerna skiljer sig åt.

Flamlängder beroende av läckagestorlek beräknas för samtliga modeller för ekvivalenta öppningar. Känslighetsanalysen görs för att analysera hur modellerna för ekvivalenta öppningar påverkar resultatet av arbetets beräkningar. Känslighetsanalysen argumenterar för val av modell för arbetets analys. Resultatet presenteras i Figur 21.



Figur 21 skillnad på olika modeller för Notional nozzle

Analysen bygger på 350 bars tryck och varierande läckagestorlek. Temperaturen på gasen och omgivningen samt omgivningens tryck är rumstemperatur och atmosfärstryck. Beräkningar görs för samtliga fem modeller som sedan jämförs via Figur 21. Utifrån figuren dras slutsatsen att modellerna endast skiljer sig marginellt vid beräkning av flamlängd. För detta arbete användes därför den förinställda modellen, Yuciel/Otugen.

## 8.2 Brandteknisk diskussion

Massflödet resulterade i att vara linjär med arean på läckaget. Både för grundläget och för designvariation 9 ökade massflödet med en faktor tio per läckagestorlek. Jetflammans längd och strålning minskade med en minskad storlek på läckage. Resultatet påvisar vikten av att implementera åtgärder som kan detektera och isolera stora läckage.

Utifrån QRA modulen beräknades förväntat medelvärde av antal jetflammar per år för grundläget, se Tabell 15. Inversen av det beräknade resultatet resulterar i antalet år per jetflamma. Invers av det beräknade medelvärdet resulterade i att jetflammar med 1% läckagestorlek förekommer en gång på 43 500 år, 10% läckagestorlek förekommer en gång på cirka 11 500 år och 100% läckagestorlek förekommer en gång på cirka 13 500 år. Utifrån resultatet kan slutsatsen dras att sannolikheten för uppkomst av jetflammar är låg, vidare bedömning om sannolikheten är acceptabel eller inte omfattas inte av examensarbetet.

Vid beräkning av sannolikheten för uppkomst av fullständiga läckage tas hänsyn till övriga läckage vid dispenser, se kapitel 3.2.1 och Ekvation 5. Övriga utsläpp symboliserar olyckor och misslyckade avstängningar vid dispenser där eventuella läckage antas leda till fullständiga läckage. Den mänskliga faktorn har en stor roll i ett fungerande och säkert system. Genom att implementera en design där storleken på ett eventuellt läckage reduceras, minskar även längden på en eventuell jetflamma förutsatt att gasen antänder.

Dispenser ska utrustas med dragbrottsventil för att stänga ett eventuellt läckage som uppstår om ett fordon kör i väg med slangen fortsatt kopplat mot fordonet. Förslag på ytterligare säkerhetsåtgärd är att implementera en funktion där dispenser ska ge signal till fordonet att tankningen är fullbordad och pistolventil är korrekt tillbakasett i dispenser. Vid utebliven signal kan inte fordonet rulla, vilket gör att fordonet inte kan köra i väg med pistolventilen kopplad mot fordonet. Om en sådan funktion är praktiskt tillämpbar kan inte detta arbete svara på utan det kräver ytterligare analys.

Jetflamman tenderar till att stiga med dess längd för grundfallet och designvariation 9. H<sub>2</sub>-TSA ställer krav på hur hög den fysiska avskiljningen ska vara. Enligt Figur 17 och Figur 20 stiger jetflamman över två meters höjd vid ett avstånd mellan 10 och 15 meter beroende på tryck. För grundfallet och designvariationer som innefattar fysisk avskiljning är avståndet till muren mindre än 10 meter. Hur jetflammas form och beteende påverkas av murens position kan inte HyRAM+ ta hänsyn till. För beräkningarna antas muren ha tillräckligt stor kapacitet för att skydda en person från direkt exponering av flammen.

### 8.3 Övriga felkällor

#### 8.3.1 Nödstopp

Inom systemet förekommer manuellt nödstopp på kompressor och dispenser. Nödstoppet är inte beaktat i analysen på grund av följande:

1. Nödstopp på kompressor förväntas endast att användas av service och underhållspersonal vid underhåll eller liknande.
2. Nödstopp på dispenser är till för att personer som tankar ska avbryta driftläge vid ett upptäckt fel. Samtliga personer som brukar tankstationen förväntas inte ha kompetensen att upptäcka ett eventuellt fel eller läckage.

Utöver anledningarna till att nödstoppet inte beaktades var utifrån tanken att dess felmod blir svårhanterad. Nödstoppets felmod är, misslyckat försök att stoppa ett eventuellt scenario. En sådan felmod medför ytterligare antaganden för beräkningarna. Oavsett beräkningar är nödstoppet en barriär för systemet och kan förhoppningsvis förhindra en olycka. Nödstopp förekommer inte som komponent i HyRAM+ vilket gör att ytterligare beräkningsmetod krävs för att komplettera beräkningarna om nödstoppet skall inkluderas i analysen.



## 9 Avslutande diskussion

Följande kapitel syftar till att diskutera arbetets genomförande om hur bland annat metodvalen kan ha påverkat analysen. Kapitlet avslutas med en diskussion om framtida forskning inom ämnet.

### 9.1 Metodval

Det finns alternativa metoder för att identifiera risker inom systemet. Exempelvis är HAZOP en alternativ metod till FMEA. För ett mer komplext system hade valet av metod varit mer avgörande eftersom metoderna är designade för något olika ändamål. Men då den definierade typanläggningen är relativt simpel valdes FMEA för att det är en användarvänlig metod samt utifrån den tillgängliga kompetensen som Risk pilot förfoga över.

HAZOP är en alternativ metod för att identifiera faror. Metoden bygger på en systematisk bedömning av systemet och dess process. Metoden är en kvalitativ teknik för att identifiera sårbarheter och faror. Genom att identifiera risker med systemet diskuteras befintliga och nya komponenters förmåga att åtgärda faror och konsekvenser (Hawkswort et al., 2022, s. 276). Metoden skiljer sig något från FMEA där HAZOP:s utgångsposition är farorna i systemet medan FMEA:s utgångsposition är komponenter inom systemet och risker med dess felmod. Flödesschema och ingående komponenter för arbetets typanläggning utgår från utkastet av H<sub>2</sub>-TSA. Om arbetet inte tagit del av utkastet och definierats på andra premisser, hade eventuellt HAZOP varit en mer lämpad metod då systemets komponenter inte varit kända.

#### 9.1.1 Typanläggning

Genom H<sub>2</sub>-TSA och presenterade konstruktionsförutsättningar framgick systemets övergripande design. Systemets komponenter förklaras generellt överskådligt och ger en bra helhetsbild över hur det fungerar. För analysens saknas det en djupare förklaring i exempelvis hur systemets styrs eller vilka risker som finns för en specifik komponent. Analysen är baserad på flertalet antaganden vilket eventuellt inte speglar verkligheten. Utöver den litterära studien borde en intervjustudie genomförts med företag som tillverkar och designar ingående komponenter eller hela vätgastankstationer. Förfrågan gick ut till en handfull företag som arbetar inom branschen, samtliga svar uteblev.

#### 9.1.2 Brandteknisk metod

Konsekvensberäkningsprogrammet HyRAM+ nyttjades vid beräkning av flamlängd beroende av håldiameter på läckage. På grund av programmets inriktning och användningsområde blev valet givet. Alternativa lösningar för att beräkna brandtekniska fenomen kan göras via handberäkningar, CFD eller andra modeller. Hur resultatet skiljer sig mellan metoderna är ett arbete för sig. Hur ställer det andra metoderna sig mot HyRAM+ och på vilket sett hade resultatet blivit annorlunda?

## 9.2 Framtida utredning gällande vätgastankstationer

I detta avsnitt analyseras om förändringar av utformning krävs och i så fall vilka förändringar som bör genomföras.

### 9.2.1 Helheten

Detta examensarbete utgår från en frågeställning där säkerhet och risk är i fokus. I praktiken är inte enbart säkerheten en faktor för vätgastankstationer, faktorer som effektivitet, ekonomisk vinning och tillgänglighet är även viktigt för helhetsperspektivet. Övriga faktorer bör analyseras och ställas mot de säkerhetsåtgärder som föreslås och analyserats. Är det rimligt med den högsta säkerhetsnivån och blir det ekonomiskt försvarbart? En kostnadsanalys är förslagsvis en metod för att utvärdera om de analyserade åtgärdsförslagen är ekonomiskt försvarbara.

### 9.2.2 Jetflammas beteende

Jetflammas beteende mot den fysiska avskiljningen analyseras inte i detta arbete. Den fysiska avskiljningen antas blockera jetflamman från direkt kontakt med personer och egendom bakom muren. Den totala strålningen från jetflamman antas påverka personer och egendom innanför avskiljningen ytterligare, vilket gör att risken för uppkomst av sekundära effekter förväntas öka. Förslagsvis kan framtida forskning syfta till att analysera sekundära effekter samt hur jetflammas beteende och egenskaper förändras vid kontakt med en fysisk avskiljning.

Den fysiska avskiljningens brandtekniska klass och beständighet mot fullständiga läckage bör analyseras. Räcker det med exempelvis en mur som uppfyller brandtekniskt krav EI 60 eller bör muren behandlas ytterligare för att uppfylla en högre klassning. Murens tjocklek och material är exempel på parametrar som kan analyseras för att uppnå tillfredställande beständighet mot kritiska kriterier för att uppfylla en acceptabel risknivå.

### 9.2.3 Explosionsberäkningar

Detta arbete begränsas till att utesluta övertryck som resulterar i explosioner för beräkning av de fysikaliska sambanden. Begränsningen gjordes utifrån att jetflamman är den mest bidragande faktorn till förväntat antal dödsfall per system-år. Detta arbete kan därför förbättras genom att beräkna konsekvenser vid detonationer och analysera dess effekt. Olyckorna i Sandvika och Gangneung resulterade i explosioner vilket påvisar relevansen i att utreda fenomenet.



## 10 Slutsats

Utvecklingen av vätgastankstationer växer i takt med att efterfrågan på vätgashantering ökar. Användningen av vätgas förväntas öka eftersom det krävs alternativ energiproduktion för att sänka våra utsläpp och bidra till en grön energiomställning. Författarens mål är att bidra till säkrare tankstationer och med underlag till framtida revideringar av H<sub>2</sub>-TSA. Ambitionen med detta arbete är att informationen som presenterats kan vara till nytta och blir användbar vid utveckling av vätgastankstationer. Nedan presenteras de slutsatser som erhållits utifrån arbetets frågeställningar.

### 1. Hur påverkas systemet om skydd/barriärer tas bort/förändras?

Förväntat antal dödsfall per 100 miljoner timmar beräknades till 0,6144 för typanläggningens grundfall. Förändringar som gav en positiv effekt på risken var att öka anläggningens område, skilja av huvudkomponenterna fysiskt, placera rören under mark, förse MEGC med en automatisk ventil, öka detektionsförmågan och sänka trycket på gasen. Det förändringar som gav en negativ effekt på risken var att ta bort den fysiska avskiljningen runt MEGC och öka antalet tankningar per år. Den relativa risken varierar från cirka 0,25 till 1,32 för de nio designvariationer som analyserats.

### 2. Vilka säkerhetssystem har störst påverkan på risknivån?

Det säkerhetssystem som ger störst påverkan på FAR är fysisk avskiljning. Genom att implementera fysisk avskiljning runt de olika huvudkomponenterna på anläggningen minskar risken och för en anläggning utan fysisk avskiljning ökar risken.

### 3. Vilka typer av läckage bidrar till störst risk? Vilket scenario ger största del av individrisken?

Jetflammar som uppstår som resultat av ett fullständigt läckage stod för störst risk. 80% av dödsolyckorna beräknades vara på grund av den typen av jetflamma. Individrisken beräknades vara störst för designvariation 4 där murar runt MEGC tagits bort. Då dödsolyckor på grund av jetflammar utgör störst sannolikhet dras slutsatsen att fysisk avskiljning ökar skyddsnivån på anläggningen.



## 11 Litteraturförteckning

- Burket. (den 4 oktober 2022). *Burket Fluid control systems*. Hämtat från Vad är en magnetventil och hur fungerar den?: <https://www.burkert.se/sv/Foeretaget-och-karriaer/Nyheter-fraan-Buerkert/Pressrum/Media/Tekniska-rapporter/Tekniska-Rapporter-Oevriga-aemnen/Vad-aer-en-magnetventil-och-hur-fungerar-den>
- Davidsson, G. (2003). *Handbok för riskanalys*. Räddningsverket (MSB).
- Deimer, A. (2000). *Riskanalys av vätgas - och vätgasfabriken vid Ringhals*. Lund: Lunds univeristet .
- Department of Defence . (1991). *Military Handbook MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment*. . Washington DC: Department of Defence .
- Dyhr, K. (2000). *Antändningsrisker genom statisk elektricitet vid vattenbegjutning av gasutsläpp*. Karlstad: MSB.
- Ehrhart, B. D., & Hecht, E. S. (2021). *Hydrogen risk assessment models (HyRAM) Version 3.1 Technical Reference Manual* . Albuquerque: Sandia National Laboratories .
- Energigas Sverige. (2022). *H2-TSA : Anvisningar – tankstationer för vätgasdrivna fordon (UTKAST 220419)*. Stockholm: Energigas Sverige.
- Groth, K. M., & Hecht, E. S. (2016). HyRAM: A methodology and toolkit for quatitative risk assessment of hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy* , 7486-7492.
- Groth, K. M., LaChance, J. L., & Harris , A. P. (2012). *Early-Stage Quantitative Risk Assessment to Support Development of Codes and Standard Requirements for Indoor Fueling of Hydrogen Vehicles*. Albuquerque, New Mexico : Sandia National Labratories.
- Hansen, O. R. (2019). *Hydrogen Safety: Kjørbo-incident, overview and perspective*. Oslo: MoZEES Workshop.
- Hansen, O. R. (2019). *Hydrogen Safety: Kjørbo-incident, overview and perspectives*. Oslo, Norge : CIENS.
- Hawkswort, S., Jordan , T., Jeffrey, K., & Melideo, D. (2022). Risk Assessment. i T. Jordan, & A. Kotchourko, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 264-298). Karlsruhe: Butterworth-Heinmann.
- Hawksworth , S., Jordan, T., Jeffrey, K., & Melideo, D. (2022). Risk assessment. i A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 264-298). Buxton, Storbritanien : Butterworth-Heinmann.
- HM Factory Inspectorate . (1976). *The explosion at Laporte Industries Ltd Ilford, 5 April 1975*. London, UK: The Health and Safety Commission.
- Howard, E. W. (2002). Vent Flows. i P. J. DiNenno, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)* (ss. Kapitel 2-3). Quincy, Massachusetts: NFPA.
- hySafe. (den 28 Juni 2018). *HIAD 2.0 - free access to the renewed hydrogen incident and accident database*. Hämtat från hySAfe International association for hydrogen safety:

<https://hysafe.info/hiad-2-0-free-access-to-the-renewed-hydrogen-incident-and-accident-database/>

Ingvarson, J., & Roos, A. (2003). *Metoder för risk- och sårbarhetsanalyser*. Lund: Lunds Univeristet.

Internetmedicin AB. (den 21 februari 2022). *Internetmedicin*. Hämtat från Evidensbaserad medicin (EBM) – Tolkning av resultat:

<https://www.internetmedicin.se/behandlingsoversikter/ovrigt/evidensbaserad-medicin-ebm-tolkning-av-resultat/#:~:text=RELATIV%20RISK%20%26%20RELATIV%20RISKREDUKTION,-F%C3%B6r%20att%20f%C3%B6rst%C3%A5&text=Den%20relativa%20risken%20%C3%A4r%20en,dividerat%20>

ISO. (2015). *ISO/TR 15916, Basics considerations for the safety of hydrogen systems*. Geneva: International Organization for Standardization.

Johansson, K. (2006). *Säkerhetsklassificering för kritiska instrumentering inom processindustri*. Lund: Lunds tekniska högskola.

Jordan, T. (2022). Hydrogen technologies. i A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 26-112). Karlsruhe, Germany : Butterworth-Heinemann.

Jordan, T. (2022). Hydrogen technologies. i A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 26-112). Karlsruhe, Germany: Butterworth-Heinemann.

Kotchourko, A. (2022). Phenomena relevant to accidents. i A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 118-184). Karlsruhe, Tyskland: Butterworth-Heinemann.

LaChance, J. L. (u.å.). *Risk reduction potential of accident prevention and mitigation features*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.

Liljedal, A. (den 23 mars 2017). *Energigas Svergie*. Hämtat från Fakta om gas: Användningsområden: <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/vatgas/anvandningsomraden/#:~:text=V%C3%A4tgas%20anv%C3%A4nds%20i%20dag%20fr%C3%A4mst,kan%20%C3%A4ven%20anv%C3%A4ndas%20som%20energib%C3%A4rare.&text=Precis%20som%20elektricitet%20%C3%A4r%20v%C3%A4tgas,lagra%20C%20tran>

Liljegren, C. J. (den 15 10 2020). *Därför ökar intresset för vätgas*. Hämtat från Tidningen Energi, El, värme & kyla: <https://www.energi.se/artiklar/darfor-okar-intresset-for-vatgas/>

Lloyd's Register Consulting. (u. å.). *Riskspectrum analysis tool: Theory manual*. London: Lloyd's Register Consulting - Energy AB.

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik. (den 29 september § 2022). *H2Stations.org*. Hämtat från H2 Stations Map: <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=5.946291&lng=23.639681&zoom=3>

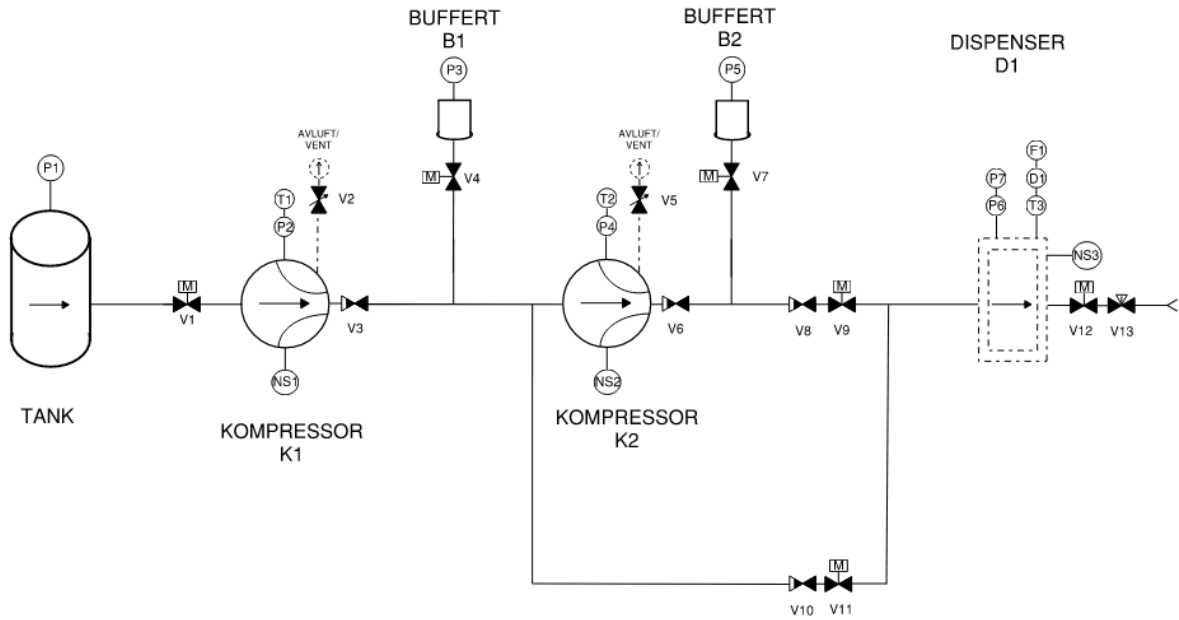
Lunds universitet. (den 11 april 2022). *Biblioteken vid Lunds universitet*. Hämtat från Vetenskapligt projektarbete T5 läkarprogrammet: Göra litteraturstudie: <https://libguides.lub.lu.se/c.php?g=297461>

Moretto, P., & Quong, S. (2022). Legal requirements, technical regulations, codes, and standards for hydrogen safety. i A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (ss. 346-390). Petten, Nederländerna: Butterworth-Heinemann.

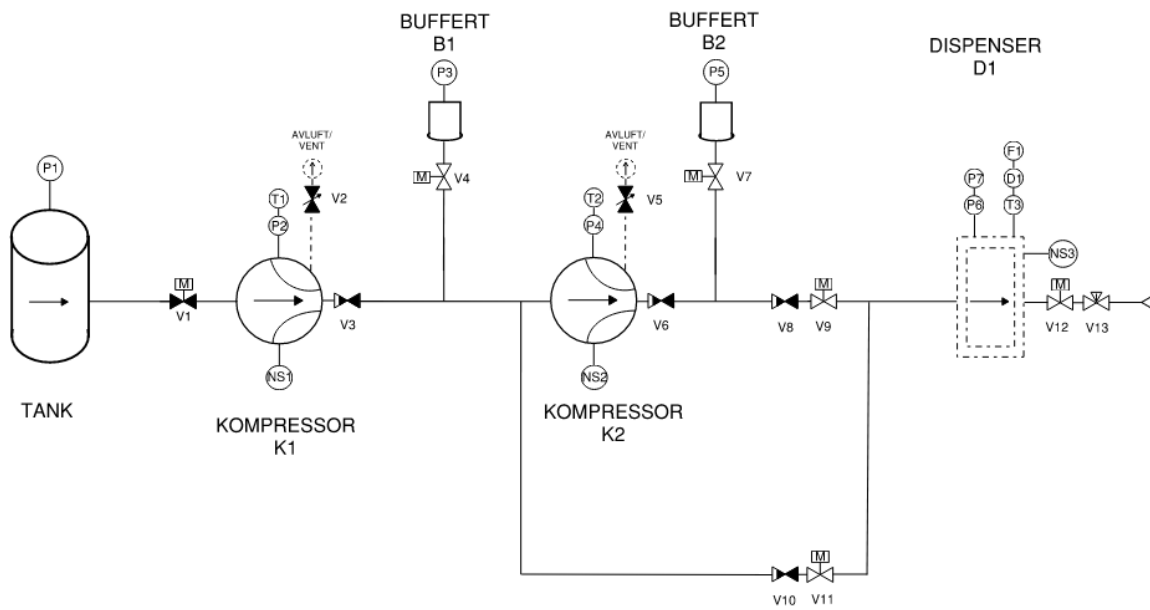
- Morin, G. (den 8 Oktober 2022). *Hamnnen*. Hämtat från Nya Gotlandsfärjan gör 35 knop på vätgas!: <https://www.hamnnen.se/artiklar/reportage/nya-gotlandsfarjan-gor-35-knop-pa-vatgas/>
- MSB . (den 12 maj 2020). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap* . Hämtat från Lagen om brandfarliga och explosiva varor: <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/brandfarligt-och-explosivt/lagen-om-brandfarliga-och-explosiva-varor/>
- MSB. (2015). *Hantering av brandfarliga gaser och vätskor på bensinstationer*. MSB.
- MSB. (2016). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om statliga myndigheters risk- och sårbarhetsanalyser*. MSB.
- MSB. (den 12 december 2019). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap* . Hämtat från Explosionsfarlig miljö (ATEX): <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/brandfarligt-och-explosivt/explosionsfarlig-miljo-atex/>
- MSB. (den 13 juni 2019). *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap* . Hämtat från Del 2 Brandfarliga varor: Brännbarhetsområde: <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/brandfarligt-och-explosivt/informationsmaterial-om-brandfarliga-och-explosiva-varor/webbutbildning---sa-fungerar-lagen-om-brandfarliga-och-explosiva-varor-lbe/del-2-brandfarliga-varor/>
- MSB. (2020). *Hantering av brandfarlig gas för yrkesmässig verksamhet : handbok*. Karlstad: MSB.
- Nationalencyklopedin. (den 03 februari 2023). *Frouds tal*. Hämtat från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/froudes-tal>
- Richard Bellairs. (den 31 januari 2019). *Perforce*. Hämtat från What Is IEC 61508? How To Determine Safety Integrity Levels: <https://www.perforce.com/blog/qac/what-iec-61508-how-determine-safety-integrity-levels>
- Sandia National Laboratories . (den 12 2022). *Sandia National Laboratories - Energy* . Hämtat från HyRAM+: <https://energy.sandia.gov/programs/sustainable-transportation/hydrogen/hydrogen-safety-codes-and-standards/hyram/>
- SIS. (2018). *SS-EN 17127:2018 Vätgas - Tankning utomhus vid vätgasenhet med fyllningsprotokoll*. Stockholm: Svenska Institutet för Standarder.
- SIS. (2020). *SS-EN 17533:2020 Vätgas - Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring*. Stockholm: Svenska Institutet för Standarder.
- SIS. (2022). *SS-EN 17124:2022 Vätgasbränsle - Produktspecifikation och kvalitetssäkring för tankstationer för vätgas*. Stockholm: Svenska Institutet för Standarder.
- SIS. (2022). *SS-ISO 19880, Tankstationer - Del 1: generella krav* . Stockholm: Svenska Institutet för Standarder.
- SIS. (2022). *SS-ISO 26142:2022*. Stockholm: Svenska Institutet för Standarder .
- Sodré, F., & James, C. (den 14 november 2022). *DNV*. Hämtat från Terminology Explained: What is Safety Integrity Level (SIL)?: <https://www.dnv.com/article/terminology-explained-what-is-safety-integrity-level-sil--207747>

- Sodré, F., & James, C. (den 14 Februari 2023). *Termonogy Explained: What is Safety Integrity Level (SIL)?* Hämtat från DNV: <https://www.dnv.com/article/terminology-explained-what-is-safety-integrity-level-sil--207747>
- Suk-won, C. (den 28 Maj 2019). Diagnosis on Korea's drive for hydrogen economy. (H. Da-eun, Intervjuare) Hämtat från <https://www.youtube.com/watch?v=igPIGvO7ibM>
- Svenska Institution för standarder. (den 18 oktober 2022). *SIS*. Hämtat från Vad är en standard?: [canvas.education.lu.se](https://canvas.education.lu.se)
- Swedish Institute of Standard . (2010). *IEC 61508-1:2010*. Stockholm: Swedish Institute of Standard .
- Sällström, J. H. (den 14 december 2022). *Motstånd mot väteförsprödning med steglastmetoden - ASTM F1624*. Hämtat från RISE: <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/motstand-mot-vateforsprodning-med-steglastmetoden-astm-f1624>
- Tehler, H. (2020). *An introduction to risk and risk management* . Lund: Division of Risk Management and Societal Safety, Lund University .
- Terminologacentrum TNC. (2012). *Basord i våra fackspråk, TNC 104*. Terminologacentrum TNC.
- TUD kansliet. (2022). *T-boken, tillförlitlighetsdata för komponenter i nordiska kraftreaktorer*. Stockholm: Vattenfall AB.
- Uniper. (den 4 December 2022). *Uniper*. Hämtat från Vätgas i Sverige: <https://www.uniper.energy/sv/sverige/om-uniper-i-sverige/vatgas-i-sverige>
- Verfonden, K. (2022). Hydrogen fundamentals. In A. Kotchourko, & T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications* (pp. 2-21). Julich, Germany: Butterworth-Heinemann.
- Vätgas Sverige . (den 4 januari 2023). *Hur tillverkas vätgas?* Hämtat från Vätgas Sverige: <https://vatgas.se/fakta/hur-tillverkas-vatgas/#:~:text=Metan%20i%20form%20av%20naturgas,till%20ytterligare%20v%C3%A4tgas%20och%20koldioxid.>
- WEH GmbH Gas Techology. (2021). *PRODUCT DATA SHEET: Type TK17 H2 70 MPa ENR, WEH Fueling nozzle with exchangable data interface for hydrogen fast filling*. Illertissen, Tyskland : WEH GmbH Gas Techology.
- Wolk, H. S. (den 1 mars 2009). *Air & Space Forces Magazine* . Hämtat från Making the H-bomb: <https://www.airforcemag.com/article/0309h-bomb/#:~:text=During%20the%20early%20years%20of,the%20US%20hydrogen%20bomb%20project.>

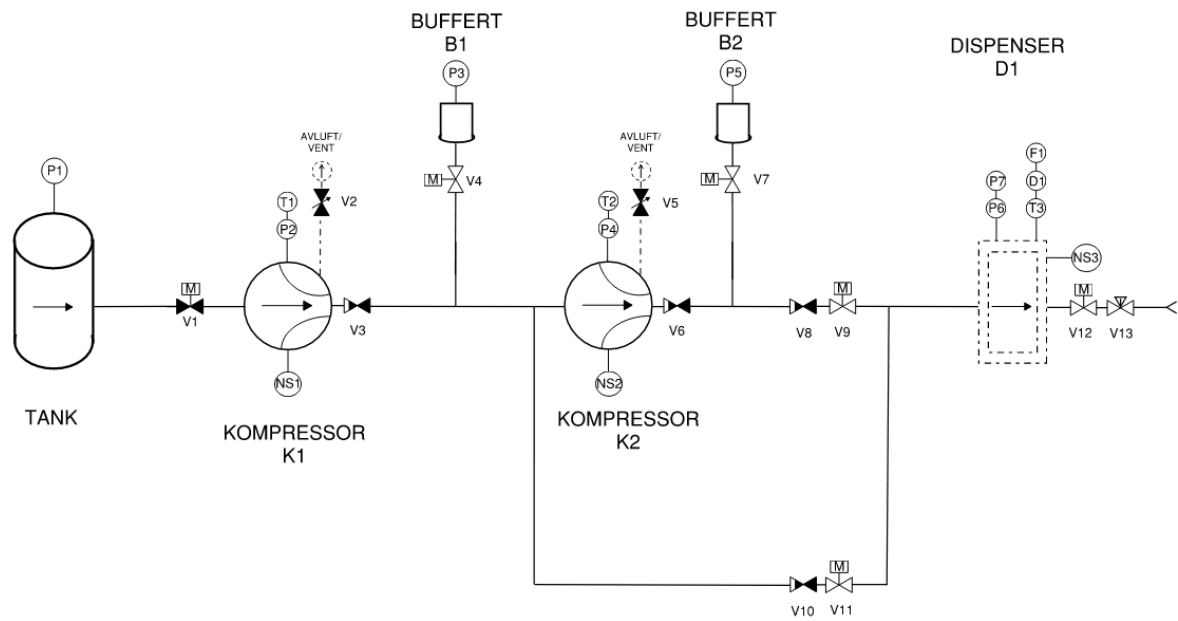
# Bilaga 1 - Flödesschema för driftlägen



Figur 22 flödesschema normalt driftläge



Figur 23 flödesschema tankläge



Figur 24 flödesschema påfyllnadsläge



## Bilaga 2 - FMEA

| Nr | Objekt typ               | Objekt nr | Driftläge | Felmod                 | Konsekvens                              | Fel-upptäckt    | Kommentar                 |
|----|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|---|-----------------|---------------------------|
| 1  | Tryckvakt                | P1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem MEGC              |
| 2  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 3  | Magnetventil             | V1        | Stängd    | Felaktig basläggning   | Tillsätter kompressor med vätgas        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 4  |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 5  | Temperaturvakt           | T1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 6  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 7  | Tryckvakt                | P2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 8  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 9  | Nödstopp                 | NS1       | Stand-by  | N/A                    | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 10 |                          |           |           |                        |   | "               |                           |
| 11 | Säkerhetsventil - avluft | V2        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 12 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 13 | Backventil               | V3        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 14 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 15 | Magnetventil             | V4        | Stängd    | Felaktig basläggning   | Vätgas i system                         | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 16 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 17 | Tryckvakt                | P3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 18 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 19 | Temperaturvakt           | T2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 20 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 21 | Tryckvakt                | P4        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 22 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 23 | Nödstopp                 | NS2       | Stand-by  | N/A                    | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 24 |                          |           |           |                        |   | "               |                           |
| 25 | Säkerhetsventil - avluft | V5        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 26 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 27 | Backventil               | V6        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 28 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 29 | Magnetventil             | V7        | Stängd    | Felaktig basläggning   | Vätgas i system                         | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 30 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 31 | Tryckvakt                | P5        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 32 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 33 | Backventil               | V8        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 34 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 35 | Magnetventil             | V9        | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 36 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 37 | Backventil               | V10       | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 38 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 39 | Magnetventil             | V11       | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 40 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 41 | Tryckvakt                | P6        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 42 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 43 | Tryckvakt                | P7        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 44 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 45 | Flödesmätare             | F1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 46 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 47 | Densitetsmätare          | D1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 48 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 49 | Temperaturvakt           | T3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 50 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 51 | Nödstopp                 | NS3       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 52 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 53 | Magnetventil             | V12       | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 54 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 55 | Läckflödesventil         | V13       | Stängd    | Utebliven funktion     | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 56 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |

Figur 25 FMEA normalt driftläge

| Nr | Objekt typ               | Objekt nr | Driftläge | Felmod                 | Konsekvens                              | Fel-upptäckt    | Kommentar                 |
|----|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|---|-----------------|---------------------------|
| 1  | Tryckvakt                | P1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem MEGC              |
| 2  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 3  | Magnetventil             | V1        | Stängd    | Felaktig basläggning   | Tillsätter kompressor med vätgas        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 4  |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 5  | Temperaturvakt           | T1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 6  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 7  | Tryckvakt                | P2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 8  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 9  | Nödstopp                 | NS1       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 10 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 11 | Säkerhetsventil - avluft | V2        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 12 |                          |           |           |                        |   |                 | "                         |
| 13 | Backventil               | V3        | Stängd    | Obefogad funktion      | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 14 |                          |           |           |                        |   |                 | "                         |
| 15 | Magnetventil             | V4        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas i system               | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 16 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 17 | Tryckvakt                | P3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 18 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 19 | Temperaturvakt           | T2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 20 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 21 | Tryckvakt                | P4        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 22 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 23 | Nödstopp                 | NS2       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 24 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 25 | Säkerhetsventil - avluft | V5        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 26 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 27 | Backventil               | V6        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 28 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 29 | Magnetventil             | V7        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas i system               | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 30 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 31 | Tryckvakt                | P5        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 32 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 33 | Backventil               | V8        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 34 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 35 | Magnetventil             | V9        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas i system               | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 36 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 37 | Backventil               | V10       | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 38 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 39 | Magnetventil             | V11       | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas i system               | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 40 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 41 | Tryckvakt                | P6        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem dispenser         |
| 42 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 43 | Tryckvakt                | P7        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem dispenser         |
| 44 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 45 | Flödesmätare             | F1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 46 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 47 | Densitetsmätare          | D1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 48 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 49 | Temperaturvakt           | T3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem dispenser         |
| 50 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 51 | Nödstopp                 | NS3       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 52 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 53 | Magnetventil             | V12       | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas till fordon            | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 54 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 55 | Läckflödesventil         | V13       | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas till fordon            | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 56 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |

Figur 26 FMEA tankläge

| Nr | Objekt typ               | Objekt nr | Driftläge | Felmod                 | Konsekvens                              | Fel-upptäckt    | Kommentar                 |
|----|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|---|-----------------|---------------------------|
| 1  | Tryckvakt                | P1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Eventuellt läckage                      | Periodiskt prov | Problem MEGC              |
| 2  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 3  | Magnetventil             | V1        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas till system            | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 4  |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 5  | Temperaturvakt           | T1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Problematik kompressor    |
| 6  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 7  | Tryckvakt                | P2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Problematik kompressor    |
| 8  |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 9  | Nödstopp                 | NS1       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 10 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 11 | Säkerhetsventil - avluft | V2        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 12 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 13 | Backventil               | V3        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 14 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 15 | Magnetventil             | V4        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas till system            | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 16 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 17 | Tryckvakt                | P3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 18 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 19 | Temperaturvakt           | T2        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Problematik kompressor    |
| 20 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 21 | Tryckvakt                | P4        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Problematik kompressor    |
| 22 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 23 | Nödstopp                 | NS2       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 24 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 25 | Säkerhetsventil - avluft | V5        | Stängd    | Läckage                | Läckage                                 | Periodiskt prov | Läckage sker kontrollerat |
| 26 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 27 | Backventil               | V6        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 28 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 29 | Magnetventil             | V7        | Öppen     | Felaktig basläggning   | Utebliven vätgas till system            | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 30 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 31 | Tryckvakt                | P5        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 32 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 33 | Backventil               | V8        | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 34 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 35 | Magnetventil             | V9        | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 36 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 37 | Backventil               | V10       | Stängd    | N/A                    | N/A                                     | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 38 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 39 | Magnetventil             | V11       | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 40 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 41 | Tryckvakt                | P6        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 42 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 43 | Tryckvakt                | P7        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad tryckförändring             | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 44 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | Driftstopp                              | "               | "                         |
| 45 | Flödesmätare             | F1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 46 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 47 | Densitetsmätare          | D1        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 48 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 49 | Temperaturvakt           | T3        | Aktiv     | Utebliven vaktfunktion | Odetekterad temperaturförändring        | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 50 |                          |           |           | Obefogad vaktfunktion  | "                                       | "               | "                         |
| 51 | Nödstopp                 | NS3       | Stand-by  | Utebliven funktion     | Misslyckat stopp av eventuellt scenario | Periodiskt prov | Eventuellt problem        |
| 52 |                          |           |           | Felaktigt stopp        | N/A                                     | "               | Inget säkerhetsproblem    |
| 53 | Magnetventil             | V12       | Stängd    | Felaktig basläggning   | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 54 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |
| 55 | Läckflödesventil         | V13       | Stängd    | Utebliven funktion     | -                                       | Periodiskt prov | Inget säkerhetsproblem    |
| 56 |                          |           |           |                        |   |                 |                           |

Figur 27 FMEA påfyllnadsläge



## Bilaga 3 – Indata för beräkningar

Tabell 17 sammanfattning av designvariationer

| Scenarier         | Variation  |
|-------------------|--|
| Grundfallet       | -  |
| Designvariation 1 | Ökat anläggningsområde                             |
| Designvariation 2 | Buffert placeras inom samma utrymme som kompressor |
| Designvariation 3 | Samtliga rör är placerade under mark               |
| Designvariation 4 | Inga murar   |
| Designvariation 5 | Kompressor och buffert omgärdas av mur             |
| Designvariation 6 | Automatisk ventil på MEGC                          |
| Designvariation 7 | Ökat antal detektorer                              |
| Designvariation 8 | Antalet tankningar fördubblas                      |
| Designvariation 9 | 450 bars tryck i system                            |

Tabell 18 indata för Designvariation 1

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar  | 28                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 64                         | 6                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| Rörparameterar                                   |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| Fordonsparametrar                                |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| Area för anläggning                              |                            |                             |
| Längd  | 50                         | 30                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| Arbetande  |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Tabell 19 indata för Designvariation 2

| Komponenter                                      | Antal: Komp + Buffert | Antal: MEGC | Antal: Dispenser |
|--|-----------------------|-------------|------------------|
| Kompressor                                       | 2                     | 0           | 0                |
| Tryckkärl  | 2                     | 1           | 0                |
| Ventiler   | 17                    | 2           | 3                |
| Instrument                                       | 7                     | 1           | 5                |
| Fogar / skarv                                    | 14                    | 2           | 4                |
| Slangar  | 0                     | 1           | 1                |
| Rör  | 22                    | 3           | 10               |
| Filter   | 2                     | 1           | 0                |
| Flänsar  | 5                     | 1           | 2                |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                       |             |                  |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                 | 11 mm       | 11 mm            |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                | 1,5 mm      | 1,5 mm           |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                 | 20 °C       | 20 °C            |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar               | 900 bar     | 900 bar          |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                 | 20 °C       | 20 °C            |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa             | 101235 Pa   | 101235 Pa        |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                     | 1           | 1                |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                       |             |                  |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                    | 20          | 20               |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                     | 2           | 2                |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                   | 250         | 250              |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                 | 10000       | 10000            |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                       |             |                  |
| Längd  | 16                    | 15          | 8                |
| Bredd  | 12                    | 7           | 14               |
| <b>Arbetande</b>                                 |                       |             |                  |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 6                     | 2           | 1                |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                  | 2000        | 2000             |

Tabell 20 indata för Designvariation 3

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 0                          | 0                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Tabell 21 - indata för Designvariation 4

| Komponenter                                      | Antal     |
|--|-----------|
| Kompressor                                       | 2         |
| Tryckkärl  | 3         |
| Ventiler   | 22        |
| Instrument                                       | 13        |
| Fogar  | 20        |
| Slangar  | 2         |
| Rör  | 35        |
| Filter   | 3         |
| Flänsar  | 8         |
| <b>Rörparameterar</b>                            |           |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm     |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm    |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C     |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar   |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C     |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1         |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |           |
| Antal fordon för en specifik station             | 20        |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2         |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250       |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000     |
| <b>Area för anläggning</b>                       |           |
| Längd  | 25        |
| Bredd  | 19        |
| <b>Arbetande</b>                                 |           |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 9         |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000      |



Tabell 22 - indata för Designvariation 5

| Komponenter                                      | Antal:<br>Kompressor | Antal: Buffert | Antal: MEGC | Antal: Dispenser |
|--|----------------------|----------------|-------------|------------------|
| Kompressor                                       | 2                    | 0              | 0           | 0                |
| Tryckkärl  | 0                    | 2              | 1           | 0                |
| Ventiler   | 13                   | 4              | 2           | 3                |
| Instrument                                       | 5                    | 2              | 1           | 5                |
| Fogar / skarv                                    | 10                   | 4              | 2           | 4                |
| Slangar  | 0                    | 0              | 1           | 1                |
| Rör  | 18                   | 4              | 3           | 10               |
| Filter   | 0                    | 2              | 1           | 0                |
| Flänsar  | 3                    | 2              | 1           | 2                |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                      |                |             |                  |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                | 11 mm          | 11 mm       | 11 mm            |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm               | 1,5 mm         | 1,5 mm      | 1,5 mm           |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                | 20 °C          | 20 °C       | 20 °C            |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar              | 900 bar        | 900 bar     | 900 bar          |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                | 20 °C          | 20 °C       | 20 °C            |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa            | 101235 Pa      | 101235 Pa   | 101235 Pa        |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                    | 1              | 1           | 1                |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                      |                |             |                  |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                   | 20             | 20          | 20               |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                    | 2              | 2           | 2                |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                  | 250            | 250         | 250              |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                | 10000          | 10000       | 10000            |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                      |                |             |                  |
| Längd  | 10                   | 6              | 15          | 8                |
| Bredd  | 12                   | 12             | 7           | 14               |
| <b>Arbetande</b>                                 |                      |                |             |                  |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 4                    | 2              | 2           | 1                |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                 | 2000           | 2000        | 2000             |

Tabell 23 - indata för Designvariation 6

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 3                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 32                         | 3                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Tabell 24 - indata för Designvariation 7

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 14                         | 2                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 32                         | 3                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Tabell 25 - indata för Designvariation 8

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 32                         | 3                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 900 bar                    | 900 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 40                         | 40                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 20000                      | 20000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |

Tabell 26 - indata för Designvariation 9

| Komponenter                                      | Antal: Utanför avskiljning | Antal: Innanför avskiljning |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Kompressor                                       | 2                          | 0                           |
| Tryckkärl  | 2                          | 1                           |
| Ventiler   | 20                         | 2                           |
| Instrument                                       | 12                         | 1                           |
| Fogar / skarv                                    | 18                         | 2                           |
| Slangar  | 1                          | 1                           |
| Rör  | 32                         | 3                           |
| Filter   | 2                          | 1                           |
| Flänsar  | 7                          | 1                           |
| <b>Rörparameterar</b>                            |                            |                             |
| Rörets yttre diameter                            | 11 mm                      | 11 mm                       |
| Rörväggens tjocklek                              | 1,5 mm                     | 1,5 mm                      |
| Temperatur gasen                                 | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Absolut gastryck                                 | 450 bar                    | 450 bar                     |
| Omgivande temperatur                             | 20 °C                      | 20 °C                       |
| Omgivande tryck                                  | 101235 Pa                  | 101235 Pa                   |
| Discharge coefficient, $C_D$                     | 1                          | 1                           |
| <b>Fordonsparametrar</b>                         |                            |                             |
| Antal fordon för en specifik station             | 20                         | 20                          |
| Antalet tankningar per fordon och dag            | 2                          | 2                           |
| Antalet dagar ett fordon antas vara i drift      | 250                        | 250                         |
| Beräknade antal tankningar per år                | 10000                      | 10000                       |
| <b>Area för anläggning</b>                       |                            |                             |
| Längd  | 25                         | 15                          |
| Bredd  | 12                         | 7                           |
| <b>Arbetande</b>                                 |                            |                             |
| Antal arbetande på anläggningen                  | 7                          | 2                           |
| Antal timmar som en arbetare är exponerad per år | 2000                       | 2000                        |