

Risicanalys av vätgas - och vätgasfabriken vid Ringhals

Andreas Deimer

**Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden**

**Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Report 5040, Lund 2000

Risicanalys av vätgas och vätgasfabriken vid Ringhals

Risk analysis of hydrogen and hydrogen production plant, Ringhals

Andreas Deimer

Report 5040

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--5040--SE

Number of pages: 43

Keywords

Hydrogen, gas, hazards, detection, sensor, HAZOP, gas explosion

Abstract

The report is a risk analysis of the hydrogen production plant at Ringhals Nuclear Power Plant, Sweden. The report also discusses potential hazards from the handling and storage of hydrogen gas. Principles of hydrogen gas detection and sensor technology are presented. A HAZOP-analysis of the plant is carried out, and recommendations of improvements based on the results of the analysis are made. Consequence calculations of unconfined hydrogen explosions are made using computer simulations.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2000.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

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

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se/english>

Telephone: +46 46 222 73 60
Fax: +46 46 222 46 12

Summary

The following report is a risk analysis of the hydrogen production plant at Ringhals Nuclear Power Plant. The production plant produces hydrogen gas for cooling of electric generators and for dosage in water systems at Ringhals.

The analysis consists of different sections. The first part deals with general risks involved in handling of hydrogen, and is not specific for the production plant. The next part describes different methods of gas detection and their ability to detect hydrogen gas. A HAZOP-analysis of the plant is carried out and the result is presented, both for the shut-down process and for normal operating conditions. The last part presents consequence calculations for unconfined hydrogen vapor cloud explosions.

The general hydrogen risk analysis focuses on risks from fire and explosion. The properties of hydrogen gas are quite different from those of other gases. It is the lightest of all gases and has an ability to diffuse through materials otherwise impermeable to most other gases. The gas can also affect the strength of some materials. The choice of materials in hydrogen gas systems is therefore very important. Hydrogen gas is easy ignitable and extremely inflammable for most concentrations. Static electricity can produce enough energy to ignite a hydrogen gas mixture. Extreme precautions should thus be taken when handling hydrogen gas.

The most common sensor principles for gas detection available today are catalytic combustion, semi-conductor technique, infrared absorption, electrochemistry or thermal conductivity. All of these principles except infrared absorption can be used for hydrogen detection. The only sensor that works in an inert atmosphere is the semi-conductor. Depending on the type of gas and concentration measured, the sensitivity and range of measurement will differ for various kinds of detectors. When choosing detection method these differences should be taken in account. To be able to compare measurements made at different points of time, a uniform working procedure for the measurements has to be applied.

The HAZOP-analysis was carried out together with personnel, with knowledge of the production process. By investigating deviations from normal operating procedures in the process, potential risks were identified. The analysis concentrated on events that can lead to the release of hydrogen gas or the occurrence of dangerous gas concentrations, like too much hydrogen or oxygen in the system. Both normal operating conditions as well as shut-down process was analyzed. The analysis resulted in a number of questions at issue that have to be answered. Some changes also have to be made to get a more efficient shut-down procedure.

Consequences resulting from unconfined vapor cloud explosions, following a release of hydrogen gas from the plant, have been investigated. The probability for such an explosion must be considered to be very unlikely. If an explosion would occur calculations show that people, outside the immediate vicinity of the plant, will not sustain fatal injuries. Damages on buildings depend on the type of building, and must be evaluated in each specific case. A methodology for this is presented in the report.

Sammanfattning

Följande rapport är en riskanalys av vätgasfabriken vid Ringhals kärnkraftverk. Fabriken producerar vätgas för användning till främst kylning av generatorer och dosering i primärvattensystemen inom Ringhals.

Riskanalysen omfattar ett antal olika delar. Den första delen av rapporten behandlar allmänna risker vid hantering av vätgas, och är således ej specifika för vätgasfabriken. Nästa del redogör för olika gasdetektionsprinciper och deras lämplighet när det gäller att detektera vätgas. En HAZOP-analys av fabriken vid både drift och avställning har gjorts och resultatet av denna presenteras. Till sist redovisas konsekvensberäkningar av explosioner efter utsläpp av vätgas.

Den allmänna riskanalysen av vätgas visar främst på de risker för brand och explosion som finns. Vätgasens egenskaper skiljer sig mycket från andra gaser. Det är den lättaste av gaser och har en mycket stor förmåga att spridas och diffundera genom material som normalt skulle vara täta mot andra gaser. Den kan också påverka hållfastheten hos vissa material. Val av rätt material i vätgassystem är således viktigt. Vätgas är brännbar i de flesta koncentrationer och är mycket lättantändlig. Statisk elektricitet är tillräckligt för att antända en vätgasblandning. Mycket stor försiktighet bör därför iakttagas vid hanteringen av vätgas.

De vanligaste sensorprinciperna för gasdetektering som finns tillgängliga bygger antingen på katalytisk förbränning, halvledarteknik, infraröd absorption, elektrokemi eller termisk konduktivitet. Alla utom den infraröda absorptionen kan användas för vätgas. Alla utom den termiskt konduktiva kan användas för provtagning. Den enda detektor som kan fungera i en syrefri atmosfär är halvledarsensorn. Sensorer kommer att ha olika egenskaper vad gäller bl a mätområden och känslighet beroende på vilken metod som används och vilken gas som önskas detekteras. Vid val av mätmetod bör alla ingående parametrar vägas samman. Vid mätningar invid utsläppsställen är det viktigt att dessa utförs enhetligt om mätresultat från olika tidpunkter skall kunna jämföras på ett korrekt sätt.

HAZOP-analysen utfördes tillsammans med personer med insyn i både driften och skyddet av fabriken. Genom att undersöka avvikelser i processen kunde identifiering av potentiella risker ske. Endast de fall som innebär att utsläpp av vätgas kan ske eller att olämpliga gaskoncentrationer erhålls i systemet (t ex för hög syrgas- eller vätgashalt) undersöktes. Både fallet då anläggningen är i drift och då den skall ställas av utreddes. Resultatet pekade främst på vissa frågeställningar som inte har blivit fullt utredda. Vissa ändringar bör dessutom göras för att få en bättre förträngning av systemet vid avställning.

Konsekvenser av fria gasmolnsexplosioner vid utsläpp från vätgasfabriken har också undersökts. Sannolikheten för att en gasmolnsexplosion med vätgas skall uppstå måste anses vara mycket liten. Skulle en sådan explosion ändå ske visar beräkningarna att endast människor som befinner sig nära fabriken kan tänkas utsättas för dödliga skador. Skador på omgivande byggnader beror på vilken typ av byggnad det rör sig om och måste därför utredas från fall till fall. Ett förslag till metodik för detta ges i rapporten.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	3
1.1	BAKGRUND	3
1.2	SYFTE	3
1.3	METODIK	3
1.4	ERKÄNNANDEN	4
2	OBJEKTSBESKRIVNING	5
2.1	RINGHALS	5
2.2	VÄTGASFABRIKEN	5
3	VÄTGASPRODUKTION	6
3.1	ANVÄNDNING AV VÄTGAS	6
3.2	PRODUKTIONSPRINCIP	6
3.3	PROCESSBESKRIVNING	6
3.3.1	Elektrolysör	8
3.3.2	Tvättorn (scrubber)	8
3.3.3	Gasklocka	8
3.3.4	Lågtrycks- och högtryckskompressor	8
3.3.5	Deoxoenheter och torkar	9
3.3.6	Bufferttank och högtryckstankar	9
3.4	SÄKERHETSSYSTEM	9
3.5	LAGSTIFTNING	9
4	VÄTGASENS EGENSKAPER OCH RISKER	11
4.1	ALLMÄNT	11
4.2	EXEMPEL PÅ OLYCKOR MED VÄTGAS	11
4.3	FYSIKALISKA FAKTA	11
4.4	EGENSKAPER	12
4.5	RISKER FÖR BRAND OCH EXPLOSION	13
4.5.1	Teori	13
4.5.2	Risker	14
4.6	RISKER MED VÄTGAS I SYSTEM	15
5	MÄTNING AV VÄTGAS	17
5.1	PROBLEM VID MÄTNING AV VÄTGAS	17
5.2	PROVTAGNINGSMETODER	17
5.3	DETEKTIONSPRINCIPER	18
5.3.1	Katalytisk förbränning	18
5.3.2	Halvledarteknik	19
5.3.3	Infraröd absorption	19
5.3.4	Elektrokemisk	20
5.3.5	Termisk konduktiv	20
5.3.6	Andra principer	21
6	HAZOP-ANALYS	22
6.1	BESKRIVNING AV HAZOP-METODIKEN	22
6.2	HAZOP-ANALYS FÖR VÄTGASFABRIKEN	23
6.2.1	Genomförande	23
6.2.2	Driftfall	23
6.2.3	Avställning	23

7	HAZOP-RESULTAT, DRIFT	24
7.1	PUNKTER RÖRANDE UTSLÄPP AV VÄTGAS OCH VÄTGASFÖRORENING.....	24
7.1.1	<i>Elektrolysör och gas/lut separatorer</i>	24
7.1.2	<i>Scrubber</i>	25
7.1.3	<i>Gasklocka</i>	25
7.1.4	<i>Kompressorer</i>	26
7.1.5	<i>Deoxo, torkar och bufferttank</i>	26
7.1.6	<i>Övriga</i>	27
7.2	ANDRA PUNKTER.....	28
8	HAZOP-RESULTAT, AVSTÄLLNING	29
8.1	INSTRUKTION 1163.....	29
8.1.1	<i>Allmänt</i>	29
8.1.2	<i>LT-sidan</i>	29
8.1.3	<i>HT-sidan</i>	30
8.2	INSTRUKTION 1166.....	31
9	GASMOLNSEXPLSIONER	33
9.1	FÖRUTSÄTTNINGAR.....	33
9.2	UPPKOMST OCH ANTÄNDNING.....	33
9.3	KONSEKVENSBEDÖMNING.....	34
9.3.1	<i>Uppkomst av tryck</i>	34
9.3.2	<i>Omsatt energi</i>	35
9.4	SKADEKRITERIER.....	36
9.4.1	<i>Människor</i>	36
9.4.2	<i>Väggar</i>	36
9.4.3	<i>Fönster</i>	37
9.5	BERÄKNINGSFALL FÖR VÄTGASFABRIKEN.....	37
9.5.1	<i>Förutsättningar</i>	37
9.5.2	<i>Beräknade tryck</i>	37
9.5.3	<i>Bedömning av skador</i>	38
10	SAMMANFATTNING AV RESULTAT	39
10.1	VÄTGASENS EGENSKAPER OCH RISKER.....	39
10.2	MÄTNING AV VÄTGAS.....	39
10.3	HAZOP-ANALYS, DRIFT.....	40
10.4	HAZOP-ANALYS, AVSTÄLLNING.....	41
10.5	GASMOLNSEXPLSIONER.....	41
	REFERENSER	42

APPENDIX A: KARAKTERISTISKA TRYCK OCH IMPULSTÄTHETER

APPENDIX B: KONSEKVENSBERÄKNINGAR, GASMOLNSEXPLSIONER

APPENDIX C: FLÖDESSCHEMAN, VÄTGASFABRIKEN

APPENDIX D: ÖVERSIKTSPLAN, RINGHALS

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Stora mängder vätgas hanteras på Ringhals kärnkraftverk. Mycket arbete har lagts ned genom systemutveckling, utbildning och förbättrade rutiner för att få en säker hantering. Det finns dock fortfarande vissa moment som behöver undersökas vidare.

Vätgas produceras sedan ett tag tillbaka i en egen vätgasfabrik. Tidigare transporterades all vätgas i gasflaskor till Ringhals. Riskanalyser har tidigare gjorts inför uppstarten av anläggningen, men vissa delar är fortfarande oklara.

1.2 Syfte

Ett av syftena med projektarbetet är att försöka ge en beskrivning av vätgasens egenskaper vad gäller risker för läckage och antändning. Det har vid Ringhals funnits en osäkerhet hos dem som hanterar gasen om hur denna uppträder i vissa situationer. Syftet är att ge en grundläggande förståelse av vätgasens speciella egenskaper och tillhörande risker samt ge ett underlag vid bedömning av risk för antändning och explosion.

För att kunna påvisa närvaro av vätgas i systemet och i luften är det viktigt att de mätinstrument som används är lämpade för detta. De instrument som används vid Ringhals idag är inte alltid lämpade för mätning i t ex inerta miljöer. Det har därför funnits en önskan att kartlägga vilka mätmetoder som är lämpade för olika användningsområden. Då vätgasen dessutom har speciella egenskaper och kan förekomma i blandningar med olika gaser i anläggningen, är det lämpligt att en undersökning av olika mätmetoder och deras lämplighet för dessa fall görs.

Det har tidigare förekommit vätgas på platser där det inte förväntats inom fabriken. En kartläggning av processen med syfte att identifiera riskerna för utsläpp bör ske med hjälp av metod lämplig för detta. En sådan analys bör omfatta driftförhållanden, men även avställning när vätgasen skall förträngas ur systemet.

Det är viktigt att hanteringen av vätgas inte påverkar den övriga verksamheten inom Ringhals på ett negativt sätt. Effekterna av en eventuell explosion med vätgas bör utredas, för att kunna bedöma om detta kan leda till skadlig påverkan på intilliggande verksamhet. Denna del av rapporten syftar därför till att utreda eventuella konsekvenser på omkringliggande byggnader och installationer.

Resultatet av ovanstående delar bör sammanfattas i en form som kan användas för utbildning av berörd personal på Ringhals.

1.3 Metodik

Arbetet inleds med insamlande av information inför analysen av vätgasens risker. Informationen hämtas främst genom litteraturundersökningar.

Information om olika mätmetoder och deras lämplighet för detektering av vätgas sker också till största delen genom litteraturstudier, men även med hjälp av produktinformation från

tillverkare av detektorer. Mätmetodernas effektivitet att detektera vätgas i luft, syrgas och kvävgas beskrivs.

För identifiering av riskerna för utsläpp och förorening av vätgasen kommer en HAZOP (Hazard and Operability Studies) att genomföras för anläggningen. Både driftfallet och avställningen undersöks. HAZOP-analysen utförs i samarbete med driftpersonal på Ringhals. Analysen sker på ett möte där anläggningens alla delar går igenom med HAZOP-metodiken. De påträffade konsekvenser som anses ha inverkan på säkerheten vad gäller vätgas presenteras sedan i rapporten.

Konsekvensberäkningar av ett större utsläpp av vätgas från anläggningen och efterföljande gasmolnsexplosion genomförs för att utreda konsekvenserna av dessa. Beräkning av utsläpp och uppkomna tryck från gasmolnsexplosioner sker med hjälp datorprogrammet CHEMS-PLUS. En metodik för att beräkna konsekvenser av uppkomna tryck på byggnader redovisas. Skador på vätgasanläggningen undersöks inte utan endast effekter på omkringliggande byggnader studeras. Inte heller skador på personer i fabriken närhet avses studeras.

1.4 Erkännanden

Ett flertal personer har under framtagandet av denna rapport bidragit med kunskap och information, och därmed utgjort värdefull hjälp vid slutförandet av rapporten.

Tommy Magnusson, brandingenjör vid Ringhals, och Berit Andersson, universitetsadjunkt vid Lunds universitet, har kontinuerligt medverkat under analysens framtagande med handledning och granskning.

Under utförandet av HAZOP-analysen har Tommy Magnusson, Torgny Olsson, Mikael Hagen, Robert Martinsson och Per Theren vid Ringhals medverkat och bistått med sakkunskap. Flera andra personer inom Ringhals organisation har dessutom bidragit med värdefull information.

2 Objektsbeskrivning

2.1 Ringhals

Ringhals är beläget vid kusten, ca 5 mil söder om Göteborg.

Kärnkraftverket är idag Sveriges största med en produktion av ca 25 TWh (1998), vilket utgör ca 17 % av Sveriges elförbrukning. Verket består av fyra reaktorer (block) varav en är kokvattenreaktor och de övriga tre är tryckvattenreaktorer.

2.2 Vätgasfabriken

Vätgasfabriken på Ringhals byggdes 1997. Fabriken är placerad i närheten av block 1, i nordvästlig riktning (se appendix D). Produktionsdelen av fabriken består av tre rum. I ett rum sker framställning och tvättning av gasen. Gasen skickas därefter vidare till de två övriga rummen för torkning, rening från syrgas och trycksättning. Ena rummet är en lågtrycksdel (34 bar) och andra rummet en högtrycksdel (200 bar).

Utanför byggnaden finns tre högtryckstankar för lagring av vätgas. Dessa är avsedda att användas som buffert vid stopp i gasproduktionen.

Rummen i byggnaden, området runt byggnaden samt områden runt utsläppsrör är alla explosionsklassade.

Fabriken är låst då ingen service sker. Området runt lagringstankarna är dessutom inhägnade. Byggnaden är åtkomlig med fordon, men någon trafik finns normalt inte i fabriken närhet.



Figur 2. 1: Bild över vätgasfabriken med lagringstankarna i förgrunden

3 Vätgasproduktion

3.1 Användning av vätgas

Vätgas används på ett flertal ställen vid Ringhals. Den största mängden går dock åt till reduktion av syre i reaktorns primärvatten samt till kylning av generatorerna vid block 1. Vätgas tillsätts vattnet för att på så sätt reducera det syre som finns i vattnet och därmed förhindra korrosion. Kylningen av generatorerna sker med hjälp av vätgas då denna har en betydligt större värmeupptagningsförmåga än de flesta andra gaser (ca 14 ggr större än luft).

3.2 Produktionsprincip

Produktionen av vätgas vid Ringhals vätgasfabrik sker med hjälp av hydrolys. Detta innebär att vätgas (H_2) bildas genom elektrolys av vatten (H_2O). Som biprodukt bildas även syrgas (O_2). Följande beskrivning grundar sig på processbeskrivning från Norsk Hydro /1/.

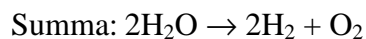
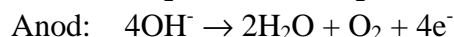
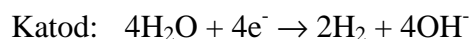
Vatten innehåller normalt en viss mängd joner, enligt jämvikten:



Då mängden joner vanligtvis är mycket liten tillsätts lut i form av kaliumhydroxid (KOH). Det medför att antalet OH^- joner ökar och lösningen lättare leder ström. Lösningen med vatten och KOH benämns elektrolyt.

Genom att sätta ned två elektroder med en viss spänningsskillnad i elektrolyten, kommer denna att utsättas för en elektrisk ström som påverkar jonerna i lösningen. De positiva jonerna kommer att dras till den negativa elektroden (katoden), och de negativa jonerna till den positiva elektroden (anoden).

Reaktionerna vid de olika polerna, och summan av dessa reaktioner blir (e^- betecknar de elektroner som fås vid katoden):

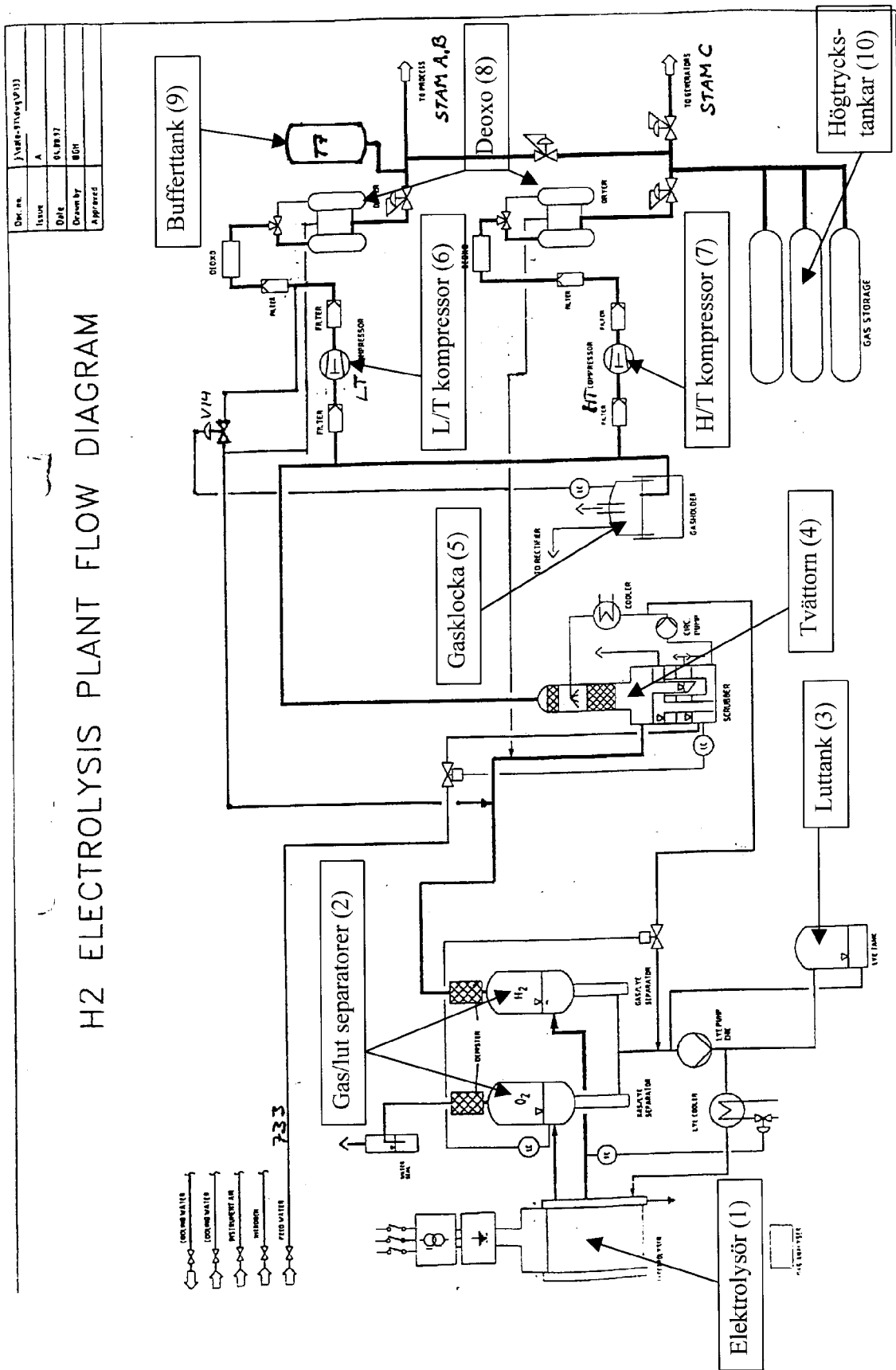


Detta medför att då 2 mol vatten förbrukas bildas 2 mol vätgas och 1 mol syrgas. Omräknat till volym innebär att för att producera 1 Nm^3 ("normal m^3 " = volym vid rumstemperatur och atmosfärstryck) vätgas förbrukas 0.8 liter vatten.

3.3 Processbeskrivning

Nedan följer en beskrivning av produktionsprocessen vid vätgasfabriken. Varje delsteg i processen beskrivs i egna underkapitel.

Siffrorna inom parentes i beskrivningen är hänvisningar till flödesschemat på nästa sida.



Figur 2. 2: Flödesschema över vätgasproduktionen

3.3.1 Elektrolysör

I elektrolysören (1) sker produktion av vätgas ur elektrolyten. Elektrolysören är uppbyggd av ett antal celler. Cellerna separeras från varandra med hjälp av elektroderna, som utgörs av platta kolstålsskivor. Totalt finns 79 celler. Över varje cell ligger en spänning på 1.8 V. Den totala spänningen ökas på så sätt för varje cell som passeras, och medför en total spänning på 146 V. Den mängd vätgas som produceras är beroende av strömmen genom elektrolysören.

Den gas som bildas samlas upp i toppen av elektrolysören och förs sedan vidare till gas/lut separatorerna (2), där gasen skiljs från luten. Syrgasen passerar därefter en gasanalysator varefter den släpps ut till atmosfären.

Luten som separeras kyls och pumpas tillbaka in i elektrolysören. Elektrolyten återanvänds på så sätt, medan nytt vatten måste fyllas på kontinuerligt allteftersom detta förbrukas. Färdigblandad elektrolyt finns i en luttank (3) utanför byggnaden och används vid uppfyllning av elektrolysören.

3.3.2 Tvättorn (scrubber)

Tvättornet (4) används till att rena vätgasen som kommer från gas/lut separatorerna, då denna gas fortfarande innehåller en del lutrester. I tvättornet kommer gasen in i botten av tornet och strömmar uppåt. I toppen av tornet finns en vattendusch som kommer att strömma i motsatt riktning mot gasen. På så sätt kommer lutpartiklarna att tvättas ur gasen. Vätgasen försvinner sedan ut genom toppen på tornet. Vattnet samlas i bottentanken på tornet varifrån det pumpas upp igen.

Bottentanken utgör också buffert för vattentillförseln till elektrolysören. Tillförseln styrs genom mätning av nivån i gas/lut separatorn.

3.3.3 Gasklocka

En gasklocka (5) finns installerad för att reglera flödet av vätgas till kompressorerna. Den är avsedd att fungera som en buffert mellan elektrolysören och kompressorerna. Sjunker trycket i systemet kommer trycket i gasklockan att göra att mer vätgas tillförs kompressorerna, och på så sätt hålla uppe trycket. Skulle trycket i systemet istället bli högre fungerar gasklockan på omvänt sätt, och trycket hålls nere.

3.3.4 Lågtrycks- och högtryckskompressor

Efter tvättornet och gasklockan trycksätts gasen via en lågtrycks- (6) och en högtryckskompressor (7). Lågtryckskompressorn (LT-kompressorn) trycksätter gasen till ca 34 bar, och är avsedd att kontinuerligt leverera vätgas vid detta tryck. Kapaciteten för kompressorn är 190 Nm³/h.

Högtryckskompressorn (HT-kompressorn) har en kapacitet på 45 Nm³/h vid en trycksättning av gasen till ca 200 bar. Detta system är avsett att främst användas till att fylla upp högtryckstankarna (10), eller till att leverera gas när lågtryckssystemet inte räcker till. Högtryckskompressorn är således inte avsedd att drivas kontinuerligt.

3.3.5 Deoxoenheter och torkar

Efter varje kompressor finns en deoxoenhet (8) placerad. Dess uppgift är att ta bort de rester av syrgas som kan tänkas finnas kvar i vätgasen. Vätgasen passerar därefter en tork där den sista fukten tas bort från gasen genom adsorption. Torken består av två torktorn av vilka endast ett används åt gången. Tornet som inte används torkas under tiden genom att värmd vätgas får passera genom tornet. Vätgasen återförs från processen.

3.3.6 Bufferttank och högtryckstankar

På lågtryckssidan finns en bufferttank (9) vars uppgift är att fungera som en buffert då gasleveransen behöver öka eller minska. Efter kompressorn på lågtryckssidan finns också en återcirkulationskrets som återför en del av vätgasen tillbaka till tvättornet. Mängden gas som återförs styrs av nivån i gasklockan.

På högtryckssidan finns tre högtryckstankar (10) som skall fungera som ett extra lager i det fall produktionen avtar eller stannar.

3.4 Säkerhetssystem

Säkerhetssystemen i vätgasfabriken bygger på principen att vid fel i något system skall inga kritiska tillstånd kunna uppstå, utan systemdelarna skall gå till ett säkert läge.

Anläggningen är utrustad med ett antal nivå-, flödes-, temperatur- och tryckmätare för övervakning av de olika systemen. Gasanalyser finns installerade för att mäta H₂-halt i O₂-gasen samt O₂-halt och vattenhalt i H₂-gasen. Vid avvikelser avger flera av dessa mätare larm och kan även stänga av elektrolysör eller kompressorer om nödvändigt. Automatstyrda ventiler skall vid förlust av instrumentluft automatiskt gå till säkert läge.

För att upptäcka läckage av vätgas inne i fabriken finns vätgasdetektorer monterade i taket i varje rum av byggnaden. Om vätgas skulle läcka ut i rummen öppnar ventilationsluckor i taket för att släppa ut gasen. Ventilationen har också förhöjd kapacitet för att hålla vätgaskoncentrationen nere. All utrustning som används i byggnaden är explosionsklassad för att förhindra en explosion vid eventuellt läckage av vätgas.

Då för höga vätgashalter i processrummen eller höga halter orenheter i H₂- eller O₂-gasen förekommer samt vid brandlarm kommer anläggningen automatiskt att nödförträngas genom att kvävgas trycks in via H₂ gas/lut separatorn. Vätgasen kommer på så sätt att ventileras till atmosfären via gasklockan. Gasklockan kommer sedan att hålla upp ett övertryck i systemet så att luft inte läcker in i systemet. Då anläggningen skall stängas av längre tid eller då arbete skall ske på den skall förträngning av vätgasen ske manuellt genom att alla delar av systemet spolas med vätgas.

3.5 Lagstiftning

Lagstiftning som behandlar verksamhetsutövarens skyldigheter vid hantering och produktion av vätgas utgörs av bland annat:

”Lag om brandfarliga och explosiva varor”, SFS 1988:868

Lagen gäller hantering och import av brandfarliga och explosiva varor. Den gäller dock inte sådan transport av varor som omfattas av lagen om transport av farligt gods.

Lagen innehåller bestämmelser om utformning av byggnader och anläggningar, kompetens hos den som ansvarar för hanteringen, krav på riskanalys och tillstånd för verksamheten.

”Lag om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor”, SFS 1999:381 (Sevesolagen)

Lagen trädde i kraft 1 juli 1999 med anledning av EU-direktiv 96/82/EG (Seveso II-direktivet) och Sveriges undertecknande av ”Konventionen om gränsöverskridande effekter av kemikalieolyckor” (Industriolyckskonventionen), och innebär en väsentlig skärpning gentemot tidigare lagstiftning. Lagen syftar till att förebygga och minimera skador till följd av olyckor med farliga ämnen för människor och miljö (undantaget arbetsmiljö). De verksamheter som omfattas av lagstiftningen bestäms av den totala mängden farliga ämnen som finns inom verksamheten, och inte endast inom en viss anläggning.

Lagen är indelade i två kravnivåer beroende på mängden farliga ämnen och omfattar hela verksamheten. Verksamhetsutövarens skyldigheter avgörs av kravnivån och kan omfatta krav på handlingsprogram (säkerhetspolicy, säkerhetsledningssystem), riskanalyser, förebyggande åtgärder, interna och externa insatsplaner samt information till allmänheten.

”Arbetsmiljölagen” SFS 1977:1160

Arbetsmiljölagen omfattar den inre miljön på arbetsplatser. Arbetarskyddsstyrelsen har med stöd av lagen gett ut ett antal föreskrifter som syftar till att garantera en säker arbetsmiljö för de anställda som hanterar farliga ämnen.

Genomförandet av Seveso II-direktivet på arbetsmiljöområdet har skett genom utgivna föreskrifter från Arbetarskyddsstyrelsen (AFS 1999:5). Dessa föreskrifter omfattar i stort sett samma krav som Sevesolagen, med tillhörande förordning och föreskrifter, inom arbetsmiljöområdet.

”Lagen om transport av farligt gods”, SFS 1982:821

Lagen behandlar farligt gods som lastas, lossas eller hantering som utgör ett led i förflyttning av godset. Transport som endast sker inom ett område omfattas ej. Lagen ställer bl a krav på klassificering, märkning, utrustning och andra försiktighetsåtgärder vid transportererna.

Från och med 1 januari 2000 skall de verksamheter som omfattas av lagen ha utsett en säkerhetsrådgivare, som skall tillse att hanteringen uppfyller de krav som ställs och fungera som ett stöd vid hanteringen av frågor som rör transport av farligt gods. Ansvaret ligger dock kvar på verksamhetsledningen.

”Räddningstjänstlagen”, SFS 1986:1102

I lagen finns bestämmelser för ägare av anläggningar att vidta olycks- och skadeförebyggande åtgärder.

För de verksamheter som avses i § 43 i lagen (bl a Ringhals) finns krav på att till viss del hålla egen utrustning och beredskap för olyckshändelser. I räddningstjänstförordningen finns skyldigheter för anläggningsägaren att analysera de risker som kan leda till sådana olyckshändelser.

4 Vätgasens egenskaper och risker

4.1 Allmänt

Väte (hydrogen) är universums vanligaste ämne i fråga om massa. Väte antas dessutom utgöra ungefär 10 % av kroppsmassan, främst som beståndsdel i vatten och som komponent i andra föreningar. Väte i form av vätgas är dock relativt ovanligt i atmosfären, vilken endast består av ca 0,1-0,5 ppm (parts per million) vätgas /2/.

Vätgas har idag ett flertal användningsområden. Den största tillämpningen är som komponent vid produktion av kemikalier, främst ammoniak och metanol. Det används även i stora mängder i raffinaderier vid framställning av bensin och andra petroleumprodukter. Andra områden är vid framställning av bl a gödningsmedel, glas, halvledarkretsar, vitaminer, kosmetika, mycket rena metaller och raketbränsle. Ett framtida användningsområde kan vara som fordonsbränsle. /21/

Det finns ett antal produktionsmetoder för vätgas som används beroende på användningsområde. Den vanligaste av dessa är genom krackning av ammoniak eller lättare kolväten, som sker vid t ex ångreformerings. När krav på hög renhet ställs kan elektrolys av vatten användas. Denna metod har dock begränsningar vad gäller produktionsmängd. Vätgas kan också framställas som en biprodukt vid petroleum- eller klorproduktion.

4.2 Exempel på olyckor med vätgas

1983 skedde i Stockholm en explosion med vätgas. Ett lastbilsflak med sammankopplade flaskpaket motsvarande 180 m³ vätgas exploderade. Olyckan orsakades av att vätgas läckte ut från en brusten koppling och antändes. Explosionen ledde inte till några dödsfall men 16 personer fick föras till sjukhus. Byggnaderna runt explosionen fick betydande skador då bl a fasaderna delvis raserades.

Den 26:e februari 1993 inträffade en explosion i ett parkeringsgarage i källaren på World Trade Center i New York. Explosionen berodde på en bomb placerad i en bil i garaget. Bombmännen hade använt flaskor med komprimerad vätgas för att förstärka effekten av bomben. Explosionen dödade sex personer och skadade stora delar av källarplanen. Vid den efterföljande branden skadades över tusen personer av brandröken.

Händelser med explosioner av vätgas har även inträffat på ett antal kärnkraftverk. Vid ett flertal tillfällen har skador på vätgaskylda generatorer medfört att vätgas läckt ut och antänts vilket vållat explosioner och efterföljande vätgasbränder.

4.3 Fysikaliska fakta

Följande uppgifter avser fakta för gasformig vätgas vid referenstemperatur 20 °C och tryck 1 atm. Data är hämtade från /2/ och /3/.

Molekylvikt	2.016
Densitet	83.7 g/m ³

Specifik volym	0.0119 m ³ /g
Specifikt värme	
C_p	14.33 J/g K
C_v	10.12 J/g K
Förbränningsvärme	
Låg	119.9 kJ/g
Hög	141.9 kJ/g
Stökiometrisk koncentration i luft	29.5 %
Stökiometrisk flamtemperatur i luft	2045 °C
Explosionsgränser	
I luft	4-75 %
I syrgas	4-95 %
Detonationsgränser	
I luft	18-59 %
I syrgas	15-90 %
Självantändningstemperatur (termisk tändpunkt)	
I luft	571 °C
I syrgas	560 °C
Antändningsenergi	
I luft	0.02 mJ
I syrgas	0.007 mJ

4.4 Egenskaper

Vätgas skiljer sig mycket från de flesta andra gaser. Detta leder till att vätgas kommer att uppträda på ett sätt som normalt inte kan förväntas av vanliga gaser.

Vätgas är den lättaste av alla gaser. Vätgasmolekylen är uppbyggd av två väteatomer ($H-H = H_2$). Beroende på atomernas inbördes rotation kan två former av vätgas uppstå. Dessa benämns para- (samma riktning) eller orto- (motsatt riktning). De är kemiskt ekvivalenta men har något skilda fysiska egenskaper. Vid normala temperaturer utgörs "normalvätgas" av ca 25 % paraväte och 75 % ortoväte /2/. De egenskaper som vanligtvis anges för vätgas härrör från "normalvätgas".

Vätgas är inte giftig vid inandning. Det är endast i samband med mycket höga koncentrationer, där luftens syre undanträngs, som vätgas kan ge upphov till kvävning /16/. Det är vid eventuell förekomst av vätgas omöjligt att upptäcka denna då vätgasen är både osynlig och luktfri. Den går således inte att upptäcka med de mänskliga sinnen.

Vätgasen har i jämförelse med andra gaser en mycket hög värmeupptagningsförmåga, ca 14 gånger den av vanlig luft. Detta utnyttjas i olika sammanhang, bland annat vid kylning av generatorer.

Vid förbränning av vätgas bildas endast vatten som biprodukt. Detta är en mycket önskvärd egenskap som har ådragit sig stort intresse från bland annat fordonsindustrin.

Då vätgas är den lättaste av alla gaser innebär detta att den snabbt kommer att stiga uppåt. Hastigheten med vilken vätgas diffunderar i luft är 3.8 gånger större än den med vilken luft diffunderar i luft /2, 18/. Vid ett utsläpp av vätgas kommer därför vätgas mycket snabbt att spridas och uppträda över ett stort område.

Vätgas har en förmåga att mycket lätt även diffundera genom andra, särskilt porösa, material. Den kan också tränga igenom material som normalt skulle stoppa andra gaser. Detta gäller t ex material som gummi och vissa typer av metaller. /22/

Vätgas är extremt lättantändligt och mycket brand- och explosionsfarligt. Gasen är inte speciellt reaktiv under normala förhållanden, men kan under vissa betingelser vara reaktiv i samband med vissa andra ämnen /18/.

Vätgas har en särskild förmåga att bilda föreningar med många andra ämnen såsom alkalimetaller, halogener och kol. Vissa metaller har dessutom förmåga att absorbera stora mängder vätgas, t ex platina och palladium. Vätgasen diffunderar in i metallen och binder sig till tomrum i metallmolekylen. Väteatomerna är på så sätt kemiskt bundna till metallen, s k metalliska hydrider. Mängden vätgas som dessa metaller kan absorbera är betydande. Palladium kan t ex absorbera ungefär 900 gånger sin egen volym av vätgas. När metallerna sedan hettas upp kommer de att avge en del av vätemolekylerna i form av vätgas. Denna princip är av intresse för fordonsindustrin som ett sätt att lagra bränsle i form av vätgas. Principen med absorption av vätgas utnyttjas även i vissa vätgasdetektorer.

En egenskap som är mycket speciell för vätgas är att, till skillnad från andra gaser, kommer gasen vid expansion att värmas upp. Detta betyder att en sänkning från högre till lägre tryck leder till att temperaturen hos gasen ökar. Denna effekt kallas Joule – Thomson effekten och uppträder för ett fåtal gaser. Effekten är ett avsteg från allmänna gaslagen och beror på en ändring i entalpinivå före och efter tryckändringen. Effekten är dock ganska svag och vid en trycksänkning från 200 bar till 1 bar är temperaturökningen ca 20 °C.

4.5 Risker för brand och explosion

4.5.1 Teori

För att ett ämne skall kunna brinna anges vanligtvis tre villkor som skall vara uppfyllda.

1. Tillräcklig mängd bränsle skall finnas tillgängligt.
2. Tillräcklig mängd syre skall finnas tillgänglig.
3. Värme (energi) för att starta branden/explosionen skall finnas.

För att den första punkten skall vara uppfylld krävs att andelen brännbar gas som finns i en blandning övergår ett visst värde. Är denna mängd för liten kommer inte en brand att kunna fortgå. Denna minsta koncentration brännbar gas vid vilken en brand eller explosion kan uppstå benämns vanligtvis undre brännbarhetsgräns eller undre explosionsgräns. Denna betecknas ofta LEL (Lower Explosion Limit).

På samma sätt som det finns en undre explosionsgräns finns det även en övre koncentrationsgräns över vilken en brand inte kan uppstå. Denna kallas övre explosionsgräns, UEL (Upper Explosion Limit). Dessa två gränser medför att en brännbar gasblandning måste ligga inom vissa koncentrationsgränser för att kunna antändas. Dessa gränser varierar för olika ämnen.

Den andra punkten kräver att en minsta mängd syre finns tillgänglig. Detta eftersom syre krävs för brandens förbränningsprocess. Blir koncentrationen syrgas för låg, ca 10 %, kommer förbränningen att upphöra. Normalt finns 21 % syrgas i atmosfären varför det normalt endast är inomhus som syrgaskoncentrationen kan bli så låg att den påverkar en brand.

Den sista punkten kräver att en viss mängd energi tillförs gasblandningen för att starta en brand. Den minsta mängd energi som krävs kallas antändningsenergin. Denna energi kan tillföras genom t ex en gnista, en flamma eller en het yta. Ämnen kan också antändas spontant utan att en antändningskälla finns tillgänglig, s k självantändning. Detta förutsätter dock att ämnet blivit uppvärmt till självantändningstemperaturen. Denna varierar för olika ämnen.

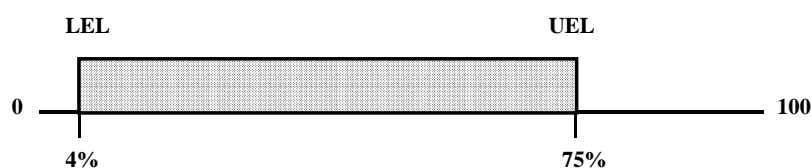
När en gasblandning antänds kan gasen förbrännas på olika sätt, beroende på förbrännings hastigheten.

- Vid diffusionsförbränning sker förbränningen långsamt. Gas som brinner med en vanlig flamma är ett exempel på denna typ av förbränning. Denna typ av bränder uppstår vanligtvis vid utsläpp ur system med lågt tryck, där gasen inte har hunnit blanda sig med syret innan antändning.
- Vid en deflagration har gasen och luftens syre hunnit blanda sig innan antändning sker. Förbrännings hastigheten är då betydligt större än vid flambranden. Detta innebär att en tryckvåg byggs upp framför flamfronten. När det talas om gasexplosioner är det vanligtvis en deflagration som menas.
- Vid en detonation är förbrännings hastigheten mycket hög och därför blir även tryckvågen betydligt högre än för en deflagration. För att en detonation skall kunna ske krävs dock speciella förhållanden. Det är inte heller alla gaser som kan detonera.

4.5.2 Risker

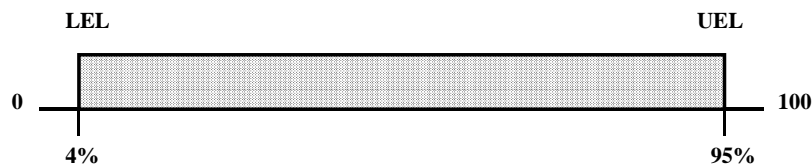
Den största risken vid hantering av vätgas är risken för brand och explosion. Vätgas har många egenskaper som gör den speciellt brand- och explosionsfarlig.

En av dessa är dess stora brännbarhetsområde. Vätgas är i luft brännbar i ett mycket stort koncentrationsområde, 4-75 %.



Figur 4. 1: Vätgasens brännbarhetsområde i luft

Vätgas i ren syrgas är brännbar i nästan alla koncentrationer, 4-95 %.



Figur 4. 2: Vätgasens brännbarhetsområde i ren syrgas

Inom dessa koncentrationsgränser kommer således en explosion att kunna uppstå. Explosionen kommer att bli som kraftigast för en blandning där all vätgas och syrgas förbrukas vid förbränningen (s k stökiometrisk blandning). Denna blandning av vätgas och syrgas benämns ofta knallgas.

Vätgas är dessutom mycket lättantändlig. Den energi som behövs för att antända en vätgas/luftblandning är endast 0.02 mJ, vilket är ca 1/10 av den som krävs för att antända en bensin/luftblandning /2/. Statisk elektricitet från en människa är tillräckligt för att skapa denna energi, och på så sätt antända en vätgasblandning.

Självantändningstemperaturen ligger på 571 °C, vilket är högre än för de flesta kolväten. Den låga antändningsenergin gör dock att vätgas totalt får betraktas som mer lättantändlig än de flesta andra gaser.

Vätgas tillhör de gaser som kan fås att detonera under vissa förhållanden. Det krävs att vätgaskoncentrationen ligger inom detonationsgränserna, 18-59 % för luft, samt en stor antändningsenergi, ca 5 kJ /2/. En explosion som börjar som en deflagration kan även övergå i en detonation, särskilt om det finns hinder framför flamfronten. Att en vätgasblandning fås att detonera är dock mycket ovanligt.

En flamma från en vätgasbrand är så gott som helt osynlig. Det kan därför vara mycket svårt att upptäcka en sådan brand utan hjälpmedel. Flamman är dock oerhört varm varför det finns stor risk för brännskador vid beröring. /16/

Vätgas är inte speciellt reaktiv under normala förhållanden, men kan i kontakt med vissa andra ämnen bilda reaktiva blandningar. Vätgas tillsammans med klor eller brom bildar explosiva blandningar som antänds mycket lätt, t ex av solljus. Vätgas reagerar explosivt med fluor. I kontakt med bland annat kväveoxider eller finfördelat nickel kan vätgas antändas.

4.6 Risker med vätgas i system

Risker i vätgassystem härrör främst från bildning av farliga koncentrationer av syrgas och vätgas i systemet samt från läckage eller utsläpp av vätgas som kan leda till brand eller explosion.

Vätgas har en oerhört stor läckagebenägenhet, vilket även gäller väte i vätskeform. Orsaken till detta är vätgasens mycket låga viskositet. Läckageförmågan är omvänt proportionell mot ett ämnes viskositet /2/. Detta leder till att vätgas kan läcka igenom på platser som normalt inte skall ha något gasläckage.

Vätgas har också en förmåga att i viss mån diffundera genom material som normalt är täta mot andra gaser. Vissa metaller, plaster och gummi är exempel på sådana material. Genom vissa porösa material diffunderar vätgas snabbt. Det är därför viktigt att material som skall ingå i vätgassystem väljs med stor noggrannhet. /24/

Det uppstår normalt inga problem med korrosion på grund av ren vätgas. Om vätgasen innehåller t ex vattenånga kan dock korrosionsangrepp ske.

I system med höga tryck finns risk för ökad vätgasabsorbtion av metaller som normalt inte absorberar någon vätgas /2/. Vätgasen kan då tränga in i metallerna och på sikt orsaka sämre hållfasthet och försvagning av metallen. Detta kan leda till sprickbildning och i vissa fall även brott i metallen. Mängden gas som absorberas beror till stor del av trycket men även av vilka metaller som används. Det är alltså viktigt med rätt val av material och legeringar.

Material som har benägenhet att bilda metalliska hydrider med vätgas bör absolut undvikas. Speciellt i system med cykliska trycksättningar spelar vätgas en stor roll vid försvagning av metaller.

Ett annat problem med höga tryck i system är risken för självantändning vid utsläpp. Ett okontrollerat utsläpp från ett högtryckssystem kan leda till självantändning av gasen utan att någon antändningskälla finns närvarande. Särskilt förekomst av rost vid utsläppsstället ökar risken för att gasen antänds. Det är dock mycket svårt att sätta en absolut gräns vid vilket tryck i systemet detta sker. Vid 79 bar skulle dock självantändning kunna ske /4/. Detta kräver dock att gasen är nära självantändningstemperaturen. Orenheter i gasen underlättar också antändningen. Vid andra försök där utsläpp till en krombelagd sfär skett har antändning skett vid 48 bar /4/.

I system som skall renas från vätgas, genom t ex kvävgasförträngning är det viktigt att alla delar av systemet renas. Vätgas har p g a att det är så lätt en förmåga att samlas i systemets högpunkter och blindgångar. Vid rening av vätgassystem är det därför mycket viktigt att systemet trycksätts och avlastas växelvis för att komma åt dessa platser.

I system där vätgas tillsätts vattnet kan vattnet komma att innehålla en betydlig mängd vätgas. I normala fall är dock vätgas endast lite lös i vatten, dock något mer än i organiska föreningar. Vätgas som tillsatts vatten kommer att till en viss del avgasas från vattnet. Hur mycket som avgasas beror på omgivningens tryck och mängden vätgas som lösts i vattnet.

Ovanför en öppen vattenyta som står i kontakt med omgivningens atmosfärstryck kommer en viss vätgaskoncentration att ställa in sig. Om vattenytan istället befinner sig i ett slutet system kommer vätgasen att ansamlas ovanför vattenytan och bilda en gasblandning. Koncentrationen hos denna beror på mängden vatten och vätgas som lösts i vattnet samt volymen gas ovanför vattenytan, och får utredas från fall till fall.

5 Mätning av vätgas

5.1 *Problem vid mätning av vätgas*

Då vätgas är explosivt i ett stort koncentrationsintervall, är det viktigt att all utrustning som används för detektering av gasen är klassad som explosionssäker.

Vätgas är den lättaste av alla gaser och diffunderar mycket snabbt när den släpps ut i atmosfären. Det kan därför vara svårt att lyckas samla upp gasen innan denna hinner spädas ut eller försvinna. Av den orsaken kan det vara nödvändigt att använda någon typ av insamlingsanordning.

Vätgas som släpps ut inomhus kommer att stiga mot taket. Så länge utsläppet inte är mycket stort eller sker precis vid takhöjd kommer koncentrationen vid takhöjd dock att vara betydligt lägre än vid utsläppsplatsen, p g a den stora utspädning som sker. Ett utsläpp under längre tid betyder inte att koncentrationen i takhöjd behöver öka nämnvärt, då gasen kommer att diffundera nedåt och blandas ut med de andra gaserna i rummet. Alla gasblandningar strävar efter hand till att bilda helt homogena blandningar.

Vid utsläpp eller läckage av vätgas kommer koncentrationen att ändras med avståndet från källan. Sker utsläppet från ett system som inte är trycksatt kommer densitetsskillnaden att driva vätgasen uppåt. Koncentrationen kommer därför att minska med avståndet allteftersom gasen sprids och späds ut. Är systemet trycksatt kommer riktningen på den jetstråle som uppstår att till en början avgöra hur gasen sprids.

Allteftersom avståndet från källan ökar kommer dock densitetsskillnaden att i större grad bestämma hur gasen sprids. Dessa effekter medför att vid mätning runt utsläpp eller vid läcksökning kommer avståndet från källan att ha betydelse för den koncentration som uppmäts.

Vätgas kan ta sig igenom material som stoppar de flesta andra gaser. På grund av detta är det möjligt att vätgas finns på ställen där andra gaser normalt inte skulle funnits.

Vätgas kan uppträda i kombinationer med andra gaser, såsom luft, ren syrgas eller ren kvävgas. Detta kommer att påverka hur detekteringen av vätgasen bör utföras.

5.2 *Provtagningsmetoder*

De gaslarmsystem som finns för detektering av gaser består av bärbara, transportabla eller fast installerade system.

Bärbara gaslarmsinstrument är små och transportabla. På så sätt kan mätning ske på utvalda platser där förhöjd koncentration misstänks eller vid läcksökning. Till skillnad från ett fast installerat system fås ingen kontinuerlig övervakning, utan mätvärdet gäller endast vid den tidpunkt då mätningen sker. Bärbara instrument kan därför utgöra ett komplement till fast installerade system.

Transportabla gaslarmsystem är ett mellanting mellan bärbara och fast installerade system. Systemet kan flyttas och placeras där mätningen skall ske. Mätningen sker därmed

kontinuerligt. Dessa system är väl lämpade att användas vid tidsbegränsade arbeten, där farliga gaskoncentrationer kan tänkas uppstå. På så sätt uppnås en kontinuerlig mätning under den tid arbetet sker.

Fast installerade system används främst när en kontinuerlig övervakning av ett utrymme anses nödvändig. Dessa system är kopplade till ett larm som aktiveras när gaskoncentrationen överstiger ett visst bestämt värde. Provtagningen av gasen sker vanligtvis genom att detektorn sitter i utrymmet där mätningen sker, varpå gasen diffunderar in i detektorn. Om utrymmet är svårtillgängligt kan istället ett sugrör dras från avkänningsstället till detektorn som därmed kan placeras i ett annat utrymme. /5/

Ett alternativ till kontinuerlig övervakning är s k samplade system, där en centralt placerad detektor är kopplad via sugrör till ett antal avkänningsställen. Genom att följa en förprogrammerad provtagningscykel mäts varje ställe ett i taget av samma detektor. /5/

5.3 Detektionsprinciper

5.3.1 Katalytisk förbränning

Katalytisk förbränning är den vanligaste detektionsmetoden för mätning av brännbara gaser. Principen bygger på att den brännbara gasen oxideras (förbränns) på ett uppvärmt katalytiskt element inne i sensorn. Det katalytiska elementet, som utgör mätsensorn, består av en fin tråd belagd med platinaoxid, som underlättar oxidationen. Det katalytiska elementet kallas ibland även pellistor.

När en brännbar gas kommer i kontakt med den uppvärmda tråden och oxideras bildas värme. Den mängd värme som bildas är proportionell mot gasens koncentration. Denna värme kommer att ändra mätsensorns temperatur och på så sätt ändra den elektriska resistansen i tråden. Resistensändringen kommer att minska strömmen genom tråden. Strömändringens storlek blir således ett mått på koncentrationen av den brännbara gasen i blandningen. /5/

- Den katalytiska sensorn lämpar sig väl för mätning av brännbara gaser. Den är särskilt väl lämpad för okända gasblandningar då den detekterar alla brännbara gaser samtidigt. Sensorerna är också relativt stabila och pålitliga.
- Nackdelarna med denna typ av sensor är den kräver en viss minimikoncentration av syre för att ge rätt mätvärde. Sjunker syrekoncentrationen kan inte fullständig oxidering ske. Sensorn är därför inte användbar vid gaskoncentrationer över undre brännbarhetsgränsen (> 100% LEL) eller i inerterade miljöer. Sensorn kommer för dessa fall att ge ett felaktigt utslag eller nollutslag. Sensorn påverkas också av föroreningar i luften. Om en sensor förorenas kan den komma att ge för lågt eller nollutslag vid närvaro av en gas.
- För mätning av vätgas kan denna metod användas så länge det finns tillräcklig mängd syre tillgänglig. Då den kräver tillgång till tillräckligt stor mängd syre för fullständig förbränning kan den dock inte användas för koncentrationer över 4% (LEL) /6/. Den kan därför inte heller användas för mätning i system som blivit inerterade med kvävgas.

5.3.2 Halvledarteknik

Tekniken bygger på en upphettad halvledarkropp som när den exponeras för en gas kommer att ändra sin ledningsförmåga. Sensorn består normalt av tre skikt, dels två lager bestående av kisel och kiseloxid, dels av ett metallskikt som ligger mot kiseldioxiden. Metallskiktet består vanligtvis av palladium, platina, silver, guld eller en blandning av dessa.

En del av de gasmolekyler som kommer i kontakt med metallskiktet kommer att diffundera genom detta och lägga sig på kiseloxiden och på så sätt skapa ett dipollager. Detta nya lager kommer att ändra spänningen som ligger över halvledaren. Mängden gasmolekyler som diffunderar genom metallskiktet kommer att stå i jämvikt med gaskoncentrationen utanför halvledaren, och på så sätt kommer spänningsändringen att vara proportionell mot koncentrationen av den undersökta gasen.

Sensorn innehåller även en temperaturmätare och värmare så att temperaturen skall kunna hållas konstant i olika miljöer. Halvledarsensorn används normalt till mätning av en speciell gas inom ett visst koncentrationsområde. /22, 23, 26/

- Halvledarsensorn har fördelen att den kan mäta i hela koncentrationsspektret, d v s 0 – 100%. Den är också oberoende av syrgaskoncentrationen. Sensorn är relativt stabilt och har en lång livslängd. Instrumenten är också relativt okomplicerade.
- Vid mätning på brännbara gaser kan sensorn dock detektera på vissa obrännbara gaser eller förbränningsprodukter.
- Halvledarsensorn lämpar sig mycket väl för detektering av vätgas. Den fungerar oberoende av syrgaskoncentrationer och kan således användas i inerta miljöer. Detektorerna kan också mäta alla koncentrationer, 0 – 100%.

5.3.3 Infraröd absorption

Metoden går ut på att sensorn mäter absorption av infraröd strålning i den gas som strålningen passerar. Detektorn är uppbyggd av två kamrar genom vilka en infraröd stråle passerar. Den ena kammaren är en referenskammare medan den andra är mätkammaren. I mätkammaren absorberas en del av ljuset av gasen, varefter ljusintensiteten mäts med hjälp av en fotoelektrisk sensor. Skillnaden i mätvärden mellan de två kamrarna är ett mått på koncentrationen av gas.

Sensorn kalibreras för att detektera ett visst våglängdsområde som är karakteristisk för den gas som skall detekteras. Det finns även detektorer som mäter över ett längre avstånd genom att sända ut en infraröd stråle. Dessa mäter den totala absorptionen över hela strålgången och kan därför inte skilja på låg koncentration i ett område och hög i ett annat. /6, 7, 22/

- Infraröda sensorer är oberoende av syrgaskoncentrationen och kan mäta alla koncentrationer, 0 – 100%. Detektorn kan också göras selektiv för att mäta en enda gas. Responstiden för detektorerna är mycket kort och de är relativt motståndskraftiga mot förgiftning av föroreningar.
- Sensorerna är ej lämpliga om gassammansättningen är okänd då gaser kan ligga utanför våglängdsområdena. Därför bör sensorerna endast användas för de gaser de är kalibrerade för. Inblandning av andra gaser (störgaser) kan medföra att instrumentet ger fel mätvärden.

- Denna typ av sensor är ej lämplig för detektering av vätgas eller syrgas då den endast kan detektera gaser med fler än en typ av atomer i molekylerna. /22/ Vätgas som endast innehåller vätemolekyler, alltså en enda typ, går därför inte att detektera. Den fungerar däremot utmärkt för de brännbara gaser som består av kolväten. Infraröda sensorer är dessutom oberoende av syrgaskoncentrationen och kan därför användas i inerta miljöer.

5.3.4 Elektrokemisk

Elektrokemiska sensorer bygger på att gasmolekyler oxideras eller reduceras på en katalytisk metall, vilket ger upphov till en elektrisk ström. Sensorn innehåller vanligtvis två till tre elektroder i en elektrolytvätska. Över en elektrod ligger en spänning, medan en elektrod är en mätelektrod som belagts med den katalytiska metallen, vanligtvis platina eller guld. Sensorn kan också innehålla en referenselektrod som normalt inte utsätts för mätgasen. Elektrolyten och elektroderna är kopplade till en elektrisk krets.

Gasen som skall mätas diffunderar genom ett membran in i sensorn, där den reagerar med katalysatormetallen på mätelektroden. Detta leder till att elektroner kommer att flöda till eller från elektroden beroende på vilken gas som mäts. Detta ger upphov till en ändring av strömmen genom elektrolyten och den elektriska kretsen. Ändringens storlek är proportionell mot gaskoncentrationen. /5, 23/

- Elektrokemiska sensorer kan göras selektiva för att bara detektera på en speciell gas genom att välja rätt elektrolyt och elektrodmaterial. Sensorerna kan detektera över hela koncentrationsspektrat, 0 – 100%. De ger också en relativt snabb respons vid detektering.
- Sensorerna är dock känsliga för föroreningar som damm och vattenånga. Detta kan delvis avhjälpas med filter som bara släpper igenom de gaserna som skall mätas.
- Detektering av vätgas kan ske med denna typ av sensorer.

5.3.5 Termisk konduktiv

Detektering av gas med en termisk konduktiv sensor sker genom värmeöverföringsförluster från en elektriskt uppvärmd resistanskropp (en fin tråd).

Värmeöverföringsförlusterna leder till en ändring i resistans hos tråden. Ändringen i resistans känns av i elektriska kretsar ihopkopplade med sensorn. Resistansändringen är proportionell mot koncentrationen av den undersökta gasen. Metoden lämpar sig bäst för gaser med hög termisk konduktivitet. /5, 18/

- Sensorn lämpar sig för mätning av höga gaskoncentrationer, ända upp till 100% gas. Sensorerna är också oberoende av syrgaskoncentrationen. Tekniken är mycket användbar vid mätning i system med konstanta gasflöden.
- Sensorn kan ofta endast användas vid högre gaskoncentrationer (ofta över LEL). Metoden kan inte heller användas till detektering av gasblandningar där gassammansättningen är okänd. Gaserna kan inte diffundera in i sensorn utan någon form av provtagningsutrustning är nödvändig. Det behövs dessutom en konstant strömning av provtagningsgasen. Ändringar av gasflödes hastigheten eller störgaser kan ge felaktigt utslag.

- Tekniken med termisk konduktiva sensorer är användbar vid vätgasmätning p g a vätgasens höga värmeledningsförmåga. Den kan också mäta i inerta miljöer då den inte är beroende av sygas för att fungera. Det kan dock vara svårt att använda detektorn för att konstatera om ett vätgassystem blivit korrekt inerterat, då sensorn har svårt att mäta på lägre koncentrationer. Metoden bör dock vara lämplig för mätning av vätgas i system som endast skall innehålla vätgas.

5.3.6 Andra principer

Det finns flera andra metoder att mäta gas. Dessa är dock inte lika vanliga som de beskrivna ovan.

Fiberoptiska sensorer bygger på att vätgas ändrar ljusabsorptionen på en tunn film, i slutet av en optisk fiber. Den optiska fibern kräver ingen elektronik varför sensorn lätt kan göras explosionssäker. Utvecklade fiberoptiska instrument finns tillgängliga idag.

Metoder finns också för att mäta gaskoncentrationer med laserljus.

6 HAZOP-analys

6.1 Beskrivning av HAZOP-metodiken

HAZOP (Hazard and Operability Studies) är en metodik för att identifiera risker i tekniska system. Metodiken används särskilt inom den kemiska processindustrin.

En HAZOP utförs av en grupp sammansatt av personer med skilda erfarenheter från olika discipliner. Studien utförs i mötesform där gruppen går igenom den undersökta processen steg för steg. Gruppen leds av en HAZOP-ledare, som inte behöver ha kunskap om processen i sig.

Syftet med studien är att identifiera händelser som kan leda till oönskade konsekvenser. Utgångspunkten för HAZOP är att studera avvikelser från processen. För att identifiera de avvikelser som kan förekomma används ett antal ledord. Några av dessa kan vara:

Inget / Nej
 Högre / Mer
 Lägre / Mindre
 Motsatt / Omvänt
 Också / Dessutom
 Annat än

Dessa ord kombineras med olika parametrar som kan ha betydelse i processen, t ex:

Flöde
 Temperatur
 Tryck
 Nivå
 Koncentration

På detta sätt kan olika avvikelser fås fram, som t ex högre/lägre/inget/omvänt flöde, hög/låg nivå o s v. För varje av dessa avvikelser som är meningsfull ställs sen frågor om vad som kan orsaka avvikelserna och vilka konsekvenser den kan leda till. För de konsekvenser där det anses nödvändigt ges sedan förslag till eventuella åtgärder. Resultatet sammanfattas vanligtvis i tabellform enligt nedan.

Ledord	Avvikelse	Orsak	Konsekvens	Åtgärd

HAZOP-analysen är ett utmärkt hjälpmedel för att identifiera risker som annars inte skulle blivit upptäckta. Genom att undersöka alla möjliga avvikelser, även de som kan verka meningslösa, täcks ett större område in än normalt. Genom att personer med olika bakgrund deltar fås ofta skilda synvinklar på problemen.

HAZOP-studien kan identifiera ett stort antal risker inom skilda områden, som t ex risker för miljö eller arbetsmiljö. Normalt undersöks dock endast de konsekvenser som är relevanta för det område som önskas studeras. /10, 11/

6.2 HAZOP-analys för vätgasfabriken

6.2.1 Genomförande

En HAZOP-analys utfördes för vätgasfabriken den 20 och 21 januari 1999. Både driftfallet och avställning studerades.

Medverkande personer var:

Andreas Deimer	Brandingenjörsstuderande, Lunds Tekniska Högskola
Tommy Magnusson	Brandingenjör, Ringhals
Torgny Olsson	Driftassistent, Ringhals
Robert Martinsson	Drifttekniker, Ringhals
Per Theren	Driftassistent, Ringhals
Mikael Hagen	Skyddsingenjör, Ringhals

6.2.2 Driftfall

Vid analysen av driftfallet undersöktes processen steg för steg utifrån flödesschema över fabriken. Det antogs att fabriken var i normal drift varför avvikelserna under dessa förhållanden granskades.

Arbetsprocessen följde till stor del den för en vanlig HAZOP-analys (som beskrivits innan).

De konsekvenser som undersöktes var möjliga utsläpp av vätgas eller orenheter i gasen. Orenheterna kunde bestå av exempelvis för mycket vätgas i syrgasen eller för mycket syrgas i vätgasen. Även andra föroreningar som t ex lutinnehåll i vätgasen undersöktes.

6.2.3 Avställning

Utgångspunkten för analysen vid avställning var att fabriken var stoppad och skulle förträngas med kvävgas.

Metodik för detta fall följde en något annan uppläggning än vid driftfallet. Då det vid förträngning finns detaljerade instruktioner för hur denna skall utföras, baserade på rekommendationer från leverantören, användes dessa som utgångspunkt. Genom att följa instruktionerna och använda flödesschema kunde hela förträngningsprocessen studeras.

De konsekvenser som undersöktes var uppkomst av oönskade gasblandningar efter förträngningen, d v s för mycket vätgas eller syrgas i kvävgasen.

7 Hazop-resultat, drift

7.1 Punkter rörande utsläpp av vätgas och vätgasförorening

7.1.1 Elektrolysör och gas/lut separatorer

1. Vätgas kan läcka igenom membranerna i elektrolysören. Detta kan leda till förhöjd H_2 -halt i O_2 -systemet. H_2 -halten övervakas av gasanalysator K905. Gasanalysatorn ger ett första larm vid hög H_2 -halt (H), och ett andra larm (HH) vid 1.97 % H_2 . Vid andra larmet sker automatisk nödförträngning av anläggningen med kvävgas. Gasanalysatorn är ej självövervakande och skickar därför ingen felsignal vid fel på instrumentet.

Kommentar: Hög H_2 -halt i O_2 -systemet har förekommit tidigare. Ett utbyte av packningen runt membranerna skedde då, varpå H_2 -halten sjönk. Den har dock därefter sakta stigit igen, vilket kan tyda på att membranerna förlorar en del av sin funktion snabbare än beräknat. Kanske bör intervallen för byte av membran och översyn av elektrolysören därför kortas.

2. Vid fel på membranerna kan även O_2 läcka in i H_2 -systemet. I normala fall har dock vätgasen lättare att tränga in i O_2 -systemet. Mätning av i H_2 sker först efter torkarna av instrument K906 resp. K907.

Kommentar: Hög O_2 -halt i vätgasen kan bero på fler orsaker än läckage i membranerna. Då vätgas har lättare att läcka in i syrgasen än tvärtom, bör ett fel på membranerna först märkas på förhöjd H_2 -halt i syrgasen.

3. Membranerna har en beräknad livslängd på 7 år. När membranerna inte kan upprätthålla sin funktion längre kommer blandningen av H_2 och O_2 -gasen successivt att öka.

Kommentar: Som tidigare nämnts i punkt 1 bör kanske dessa intervall kortas om det visar sig att H_2 -halten i O_2 -systemet ökar mer än beräknat.

4. Skulle lutnivån öka tillräckligt mycket i vätgasens eller syrgasens gas/lut separatorer kan lut följa med till scrubbern. Detta kan leda till förhöjd lutkoncentration i vätgasen om inte all lut tvättas bort i scrubbern. För att förhindra detta finns nivåövervakning i syrgas/lut separatorn (K422). Denna styr en ventil (V337) som reglerar vattenflödet från scrubbern till elektrolysören. Vid förlust av styrning till ventilen kommer denna automatiskt att gå till stängt läge. Dessutom finns två larm på hög nivå (H och HH) i syrgas/lut separatorn.

Kommentar: De system som finns för mätning och styrning av nivån i gas/lut separatorerna anses vara tillräckliga. Ingen mätning av nivån i H_2 -separatorn sker, men då de två separatorerna står i kontakt med varandra kommer en hög nivå i den ena att även leda till hög nivå i den andra.

5. Skulle vätgasen innehålla för mycket lut kommer detta inte att upptäckas då ingen mätning av lutinnehållet sker. Det är oklart vilka skadeverkningar lutrester kan ha på systemen om det följer med vätgasen.

Kommentar: Om förhöjd luthalt i vätgasen kan orsaka skador på de system som använder sig av vätgasen, är det möjligt att mätning av lutinnehållet är nödvändig.

6. Luttanken är normalt avstängd mot det övriga systemet vid drift. Detta sker endast med enkla ventiler. Det kan dock inte uppstå några större tryckskillnader mellan tanken och elektrolysörens lutsystem.

Kommentar: *Då luttanken är avstängd mot systemet skall normalt ingen lut gå tillbaka till tanken, då det inte är någon större tryckskillnader över ventilen. Skulle avstängningsventilen vara öppen finns däremot risk för att vätgashaltig lut kan följa med till luttanken. Området runt tanken är inte explosionsklassat, men en liten mängd kvävgas spolas kontinuerligt genom tanken.*

7.1.2 Scrubber

7. Skulle demistern sätta igen i scrubbern eller systemet sättas igen på annat sätt efter scrubbern, kommer trycket i systemet att byggas upp och vätgasen att ventileras ut till atmosfären genom ett vattenlås i scrubbern. Ingen automatisk övervakning av drifttrycket sker. Dock kontrolleras tryckskillnaden över demistern manuellt (K201).

Kommentar: *Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.*

8. Om separeringen av luten från vätgasen inte blir fullständig kommer detta inte att detekteras då ingen mätning av lutrester sker.

Kommentar: *Se punkt 5.*

7.1.3 Gasklocka

9. Vid för låg nivå i gasklockan sjunker trycket i systemet. Detta kan bero på att elektrolysören inte hinner med att producera tillräckligt med gas eller att påfyllningen av vatten till gasklockan inte fungerar. För låg nivå kan leda till att kompressorerna börjar suga ett undertryck, och luft på så sätt kommer in i systemet. För att förhindra detta finns nivåmätare i gasklockan (K424 och K425) som ger larm vid för låg nivå och stänger av kompressorerna. Det sker även tryckmätning vid intagen till kompressorerna (K122 och K133), vilka också ger larm på lågt tryck och stänger av kompressorerna.

Kommentar: *Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.*

10. Vattnet till gasklockan kommer från system 196. Detta system är kopplat till en hydrofor. Det kan hända att den tank som finns blir luftfylld. Luft kan då följa med systemet. Konsekvensen kan bli att luft kommer in i gasklockan och vattenlås T5. Detta medför att en farlig gasblandning kan erhållas i gasklockan.

Kommentar: *Det har tidigare inträffat att tanken blivit luftfylld. Påfyllningen av vatten från system 196 bör därför ses över. Möjligtvis kan tanken kopplas bort.*

11. Skulle vattnet i gasklockan försvinna kommer vätgasen att ventileras till atmosfären.

Kommentar: *Vattnet till gasklockan kommer från system 196. Det är därför viktigt att detta system hela tiden kan leverera vatten (se punkt ovan). Ingen automatisk kontroll sker av vattennivån i gasklockan.*

7.1.4 Kompressorer

12. För högt tryck efter eller för lågt tryck in gör att kompressorn stängs av.

Kommentar: Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.

13. I kompressorernas kondensattankar (T13 resp. T19) separeras kondensatet från vätgasen. Skulle kondensatnivån försvinna genom att ventil V103 resp. V119 släpper ut för mycket kondensat, kommer vätgas att släppas ut i rummet genom golvbrunnen som skall ta hand om kondensatet. Ventil V103/V119 styrs av mätning av låg och hög nivå i kondensattankarna och skall därför normalt inte släppa ut för mycket kondensat.

Skulle dock ventilen fela och låsa sig i öppet läge finns ingen ytterligare ventil som hindrar utsläpp av vätgas. Kompressorn kommer att ställas av när nivån blir tillräckligt låg i tanken.

Kommentar:. Detta problem är svårt att undkomma eftersom visst flöde skall ske genom ventilen i normalfallet. En installation av en andra nivåstyrd ventil skulle eventuellt minska riskerna. Skulle ett utsläpp ske anses detekteringen tillräcklig genom att larm ges för låg nivå i kondensattanken. Finns misstanke om att utsläpp skett bör tillträde till fabriken förbjudas tills åtgärder tagits för att säkerställa vätgasfri atmosfär.

7.1.5 Deoxo, torkar och bufferttank

14. Skulle trycket stiga i LT-systemet finns tryckmätning i bufferttank 371 T7. Vid larm om högt tryck kommer ventil V14 att öppnas något för att släppa tillbaka en större del av vätgasen till scrubbern genom återcirkulationssystemet. Ventil V14 styrs dock även av nivån i gasklockan, som när nivån höjs kommer att stänga ventil V14 något. En fråga ställdes hur styrningen av ventil V14 sker, d v s vilken styrning som överrider den andra.

Kommentar: Undersökning av ventilens funktion visar att nivån i gasklockan styr ventilens funktion, men även att instrument 371 K101 styr likriktarens funktion. En ökning av trycket i tank 371 T7 kommer därmed att minska vätgasproduktionen. Ett jämviktsläge kommer på så sätt att ställa in sig. Det enda fall som skulle kunna leda till utsläpp av vätgas är då uttaget av vätgas minskas så snabbt att likriktaren inte hinner reglera ned produktionen tillräckligt snabbt. Detta kan leda till att både nivån i gasklockan ökar samt att trycket i tank 371 T7 ökar. Stiger trycket tillräckligt mycket i tanken kommer ventil V14 att öppnas trots att nivån i gasklockan är hög. Det är med andra ord bättre att släppa ut vätgasen genom gasklockans avluftning än att trycket i tanken ökar för mycket.

15. För att deoxon skall kunna rena vätgasen från syret krävs att deoxons temperatur hålls över vattnets mättnadstemperatur. Detta sker genom att en förvärmare (E8 resp. E16) värmer vätgasen innan den kommer till deoxon. Skulle denna värmning inte fungera kommer vätgasen att innehålla en fortsatt hög andel syrgas. Mätning av syrgasinnehållet sker inte direkt efter deoxon utan först efter torkarna.

Kommentar: Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.

16. En ökning av syrehalten i vätgasen gör att temperaturen i deoxon kommer att öka. En ökning på 0,1% medför en temperaturökning på ca 14 °C. Stiger temperaturen tillräckligt mycket kommer temperaturmätare (K514 resp. 524) att stänga av deoxon och likriktaren till elektrolysören. Det är dock oklart hur mycket temperaturen i deoxon kan tänkas stiga om vätgasen skulle visa sig innehålla en för stor mängd syrgas. Kan temperaturen stiga till vätgasen självantändningstemperatur erhålls ett farligt läge då även syrgashalten är ovanligt hög. Syrgashalten mäts först efter torken.

Kommentar: *Det bör undersökas hur mycket temperaturen i deoxon kan stiga*

7.1.6 Övriga

17. Det trycksatta systemet i fabriken ställs inte av mot vätgasrampen med två ventiler. Det finns dock en backventil i slutet på fabriken system, men det är osäkert om denna kan betraktas som en avstängningsventil. Avluftning mellan avstängningsventilen och backventilen finns.

Kommentar: *Närmare undersökningar har visat att dubbla avstängningsventiler med mellanliggande avluftning finns. Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.*

18. Om avluftningsrören för högtryckstankarna riktas mot själva tankarna är det tänkbart att tankarna utsätts för hög värme från en eventuell brand i gasutsläppet.

Kommentar: *Rören är riktade ca 45° från tankarna och bör på så sätt inte utgöra någon fara. Det kan dock innebära fara för människor som befinner sig på marken intill rören.*

19. Vid vätgasrampen finns avluftningsrör som mynnar ner i marken.

Kommentar: *Om det anses nödvändigt skulle ändring ske så att utsläppet sker högre upp.*

20. Om instrumentgasen försvinner kommer alla instrument att automatiskt gå till säkert läge. Detta leder också till att ventil V261 och 262 kommer att öppna och automatisk förträngning av systemet med kvävgas sker. Larm finns för lågt tryck i instrumentgasen.

Kommentar: *Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.*

21. Frågor finns om det är tillräckligt att vattennivån i vattenlåsen endast kontrolleras manuellt, utan automatisk övervakning.

Kommentar: *Normalt tillförs lite vatten kontinuerligt till vattenlåsen. Skulle detta flöde upphöra och nivån sjunka i ett vattenlås och vätgas på så sätt kan läcka ut i rummen kanske en automatisk övervakning vore lämplig för att inte utsätta personalen som ronderar för fara.*

7.2 Andra punkter

22. Vid låg nivå i gas/lut separatortankarna kommer nivåövervakningen på syrgassidan att stänga av likriktaren, och på så sätt stoppa produktionen av vätgas.
23. Skulle en minskning av lutkoncentrationen ske kommer elektrolysören att tappa verkningsgrad. Lutkoncentrationen kontrolleras manuellt.
24. Sänkt temperatur i elektrolysören leder till minskad H₂-produktion.
25. Temperaturen på luten övervakas av temperaturlarm K505, som ger larm vid förhöjd temperatur.
26. Minskas flödet av lut till elektrolysören kommer instrument K303 att ställa om elektrolysörens likriktare till 0 och processen stannar.
27. Luttanken är ventilerad mot atmosfären. Det är bara lut i tanken när elektrolysören skall tömmas, vilket normalt sker vart 7:e år. I samband med detta spolas tanken med kvävgas.
28. Byte av temperaturmätare i deoxon (K507 resp. 520) kan ske utan att kvävgasförträngning av deoxon sker.

8 Hazop-resultat, avställning

8.1 Instruktion 1163

8.1.1 Allmänt

1. Vid mätning av koncentrationer i systemet efter förträngning anges i instruktionerna tillåten gräns för vätgaskoncentrationen till 20% av LEL, och syrgaskoncentrationen till 1%. Varför dessa koncentrationer valts som gränser är inte klart.

Kommentar: Enligt /12/ skall vid avställning vätgaskoncentrationen sänkas till under 25 % av LEL. Skall hetarbete utföras på systemet skall koncentrationen understiga 5 % av LEL. Vad gäller syrgaskoncentrationen skall den sänkas till 25 % av den koncentration som krävs för att underhålla brand. Då vätgas i syrgas är brännbar upp till 95-96 % krävs det ca 4-5 % syrgas för att underhålla en brand. 25% av detta är således ca 1%.

Instruktionerna bör ändras så att koncentrationsgränserna sätts till: 25 % av LEL vätgas vid normal avställning, 5 % av LEL vätgas vid hetarbete, 1 % syrgas vid avställning och idrifttagning.

8.1.2 LT-sidan

2. Op nr 68 (m fl): Ventilen skall öppnas och det skall kontrolleras att kvävgas kommer. Oklart hur detta skall gå till.

Kommentar: Det bör framgå av instruktionen om ventilen endast skall öppnas för att kontrollera att det finns ett flöde, eller om mätning av koncentrationen skall ske.

3. Op nr 80 (m fl): Det anges att bara att det skall kontrolleras att kvävgas kommer ur ventilen. I andra liknande instruktioner (t ex 68–69) finns både en instruktion för öppning och en för stängning av ventilen.

Kommentar: Instruktionerna bör ändras så att de blir enhetliga, och att det klart framgår vad som menas.

4. Torkarna kan innehålla vatten efter driften. Ingen speciell torkning av torktornen sker innan förträngningen. Det kanske är möjligt att vätgas binds i detta vatten för att sen avgasa.

Kommentar: Om nödvändigt kan tornen torkas innan kvävgasspolning sker.

5. Op nr 98: Ventil V2 i slutet av återcirkulationssystemet öppnas. Då både ventil V15 och V20 är stängda kommer dock ingen kvävgasspolning av systemet efter V15 att göras. Det kan stå vätgas i denna del då ingen spolning heller sker när förträngning av kompressorn görs. Trycket i systemet släpps dock då, men ingen direkt trycksättning av systemet sker när kompressorn startas, så det bör finnas vätgas kvar i återcirkulationssystemet. Vätgasen kan sedan tänkas läcka tillbaka till kompressorn.

Kommentar: Som instruktionen är utformad för tillfället sker ingen kvävgasförträngning av återcirkulationssystemet efter ventil V13 och V15. Instruktionerna bör därför snarast ändras. Förslagsvis införs en instruktion där ventil V2 öppnas för att vädra ut vätgasen i återcirkulationssystemet samtidigt som detta görs för ventil V19 (op nr 66), och får på så sätt stå öppen under det att kompressorn går. Efter förträngningen av kompressorn bör ventil V13 stängas. Innan instruktion 98 bör en extra instruktion finnas som öppnar ventil V15, så att trycksättning och spolning av återcirkulationssystemet kan ske.

- Op nr 100–101: I dessa instruktioner spolas torken via ventil V141 till atmosfären. När torken spolas första gången (op nr 82–88) växlas mellan torktornen för att bägge skall spolas igenom. Detta görs inte i op nr 100–101.

Kommentar: Bägge tornen bör spolas igenom även här.

8.1.3 HT-sidan

- Op nr 182 (m fl): I dessa instruktioner står endast ”kontrollera gashalten”. Det är oklart om detta betyder att mätning skall utföras, och i så fall vilka värden som gäller, eller om det bara skall ”kontrolleras att kvävgas kommer”.

Kommentar: Av instruktionen bör framgå om mätning skall ske, och i så fall hur denna skall gå till, och vilka koncentrationsgränser som gäller. För koncentrationsgränser, se punkt 1. En enhetlig mätprocedur bör införas för hur mätning skall utföras. Val av mätpunkter och mätavstånd, är sådant som bör utföras likartat.

- Op nr 194: Som komponent bör stå V159 istället för C20 och C21.

Kommentar: Bör ändras.

- Op nr 196: Det står att torn skall skiftas om det går.

Kommentar: Detta bör kunna göras.

- Op nr 200–209: I dessa instruktioner är det tänkt att spolning av återcirkulationssystemet till scrubbern och till atmosfären via ventil V159 skall ske. Det kommer dock inte att flöda någon kvävgas genom det avställda tornet eftersom både ventil V71 och V422 är stängda. Det spelar ingen roll om V159 är öppen mot atmosfären eller inte då ingen kvävgas går genom systemet.

Problemet uppstår eftersom regenereringsgasen till torktornen, till skillnad från torken på LT-sidan, tas ut efter avstängningsventilen mot högtryckstankarna (ventil V71). Ventil V422 måste dessutom vara stängd för att den kvarstående vätgasen på högtryckstankarnas sida inte skall läcka in i torken.

Kommentar: Med dagens utformning där regenereringsgasen hämtas efter ventil V71 finns ingen möjlighet att förtränga torkens återcirkulationssystem till scrubbern samtidigt som torken är avskild mot högtryckstankarna.

11. Op nr 239-240: Koncentrationsmätning skall ske vid ventil V6. Här kommer dock ingen flöde att finnas då ventil V71 och V422 är stängda.

Kommentar: Detta är samma problem som i punkt 10.

12. Op nr 247-248: När ventil V421 stängs och V71 öppnas kommer vätgas att gå bakvägen genom ventil V68, som är öppen, tillbaka till torken som skall vara rensplad från vätgas.

Kommentar: Med den nyinstallerade ventilen V422 skall kompressorn kunna ställas av mot högtryckstankarna. Till skillnad mot LT-sidan är ventilen dock installerad så att bypassventilen V68 leder förbi såväl ventil V67 som V422. En instruktion bör därför införas för HT-sidan som stänger ventil V68 innan ventil V71 öppnas.

13. Op nr 268: Ventil V422 öppnas till torkens regenereringssystem. Varför detta görs är oklart. Kvävgas kan möjligtvis gå genom torktornen, men det kommer inte att vara något flöde genom återcirkulationssystemet till scrubbern, då ventil V159 är stängd mot atmosfären (op nr 209) samt V5 och V6 är stängda vid scrubbern.

Kommentar: Varför ventil V422 öppnas här är oklart. Om tanken är att spola torkens återcirkulationssystem eller ut till atmosfären via ventil V159 bör ventiler öppnas som möjliggör detta.

14. Ingen kvävgasspolning sker mellan V49 och V50. V49 stängs innan vätgastrycket släpps på LT-sidan. När trycket på HT-sidan sjunker under 40 bar kommer även V50 att stänga. Detta betyder att det bör kunna stå 40 bar vätgas mellan ventil V49 och V50. Det är dock möjligt att dessa ventiler ligger alldeles intill varandra så att det inte finns någon volym mellan dem.

Kommentar: Avståndet mellan ventilerna är 100 mm och rördimensionen 12 mm. Den mängd vätgas som kan finnas här är alltså mycket begränsad. Inga ytterligare åtgärder anses nödvändiga.

15. Det är oklart om det finns två ventiler mellan trycksidorna på vätgasfabriken och vätgasrampen om inte backventilerna (V39 och V77) räknas som sådana.

Kommentar: Se punkt 18, HAZOP-resultat, drift.

8.2 Instruktion 1166

16. Op nr 4: Ventil V71 stängs för att koppla bort kompressorn och torken på HT-sidan. Eftersom ventil V422 är öppen kan gas komma in genom torkens regenereringssystem.

Kommentar: En instruktion för att stänga ventil V422 bör införas i samband med stängningen av ventil V71.

17. Op nr 11: Efter denna instruktion skall trycksättning ske. Ventil V44 står dock öppen till atmosfären.

Kommentar: "Ventil V44 stänges" införs efter op nr 11.

18. Op nr 14-15 (m fl): Sista delen på instruktion 14 kan flyttas till början av instruktion 15. Instruktion 14 lyder då: ”Öppnas”. Instruktion 15 lyder då: ”När K102 visar ca 3 bar. Stänges”. Detta finns på flera andra instruktioner.

Kommentar: Bör ändras.

19. Op nr 32, 34, 36, 50, 52, 65, 77, 89: I dessa instruktioner står att gasen skall ”kontrolleras fri från vätgas”. Det är oklart om mätning skall ske vid all dessa tillfällen. Det saknas också gränsvärden på gaskoncentrationerna om mätning skall ske.

Kommentar: Av instruktionen bör framgå om mätning skall ske, och i så fall hur denna skall gå till, och vilka koncentrationsgränser som gäller. För koncentrationsgränser, se punkt 1. En enhetlig mätprocedur bör införas för hur mätning skall utföras. Val av mätpunkter och avstånd som mätning skall ske på är sådant som bör utföras likartat.

20. Op nr 47: Det bör stå ”upprepa 41-45” istället.

Kommentar: Bör ändras

21. Op nr 54: Efter denna instruktion bör även en instruktion finnas för att stänga ventil V72.

Kommentar: Bör ändras

22. Op nr 58, 70, 82: Efter dessa instruktioner skall trycksättning åter ske . Ventilerna som öppnats för att släppa trycket (ventil V93, V95, V97) är dock öppna. Detta för att trycket skall kunna byggas upp i tankarna igen.

Kommentar: Instruktioner för att stänga ventil V93, V95 resp. V97 bör införas efter ovanstående instruktioner.

23. Op nr 64: Det bör stå ”upprepa 59-63” istället.

Kommentar: Bör ändras.

24. Op nr 76: Det bör stå ”upprepa 71-75” istället.

Kommentar: Bör ändras.

25. Op nr 81: Det bör stå 371V95(T10) till 371V97(T10) som komponent.

Kommentar: Bör ändras.

26. Op nr 88: Det bör stå ”upprepa 83-87” istället.

Kommentar: Bör ändras.

9 Gasmolnexplosioner

9.1 Förutsättningar

Följande kapitel behandlar konsekvenser av fria gasmolnexplosioner, d v s den typ av explosioner som normalt uppkommer vid gasutsläpp utomhus. Konsekvenser av fria gasmolnexplosioner skiljer sig mycket från explosioner i slutna miljöer, varför det är viktigt att hålla isär dessa begrepp. Slutna explosioner undersöks inte då det främst är konsekvenser för omkringliggande byggnader som avses studeras.

De konsekvenser som undersöks är endast de som uppstår av tryckuppbyggnad vid explosion, då det främst är skador på byggnader som avses studeras. Andra konsekvenser av t ex värmestrålning behandlas ej, eftersom dessa ej utgör ett lika stort hot mot byggnader. Tryckpåverkan på människor kommer dock att beskriva översiktligt.

Det görs i detta kapitel inte heller någon analys av sannolikheten för uppkomst av fria gasmolnexplosioner. Vid utsläpp av gas utomhus sker inte alltid antändning, och om det ändå sker är det inte säkert att denna leder till en explosion.

Den metodik för konsekvensbedömning som beskrivs i detta kapitel är främst hämtad från "Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor" /9/, samt från "Loss Prevention in the Process Industries" /10/.

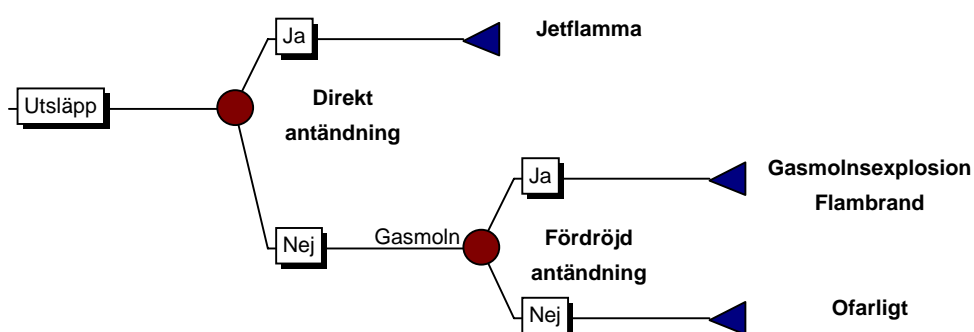
9.2 Uppkomst och antändning

Ett utsläpp av brännbar gas utomhus kan leda till ett antal olika scenarier. Om utsläppet antänds direkt vid utsläppsstället kommer en jetflamma att bildas. Vid en jetflamma sker ingen tryckuppbyggnad utan det är främst värmestrålning från flammen som kan ge upphov till skador.

Om ingen direkt antändning sker kommer istället ett gasmoln att bildas, vilket kan antändas i ett senare skede. Om molnet antänds kan en gasexplosion uppstå, men beroende på molnets sammansättning kan även en flambrand uppstå. För en flambrand är det främst värmestrålningen som ger upphov till skador.

Det är inte säkert att någon antändning sker alls, varvid gasmolnet efter hand späds ut så mycket att det inte längre ligger inom brännbarhetsområdet.

Nedan visas ett händelsetråd för ett gasutsläpp i det fria.



Figur 9. 1: Händelsetråd för utsläpp av brännbar gas

Vid utsläpp av vätgas ur system är generellt sannolikheten högre att antändning sker vid utsläppspunkten än för de flesta andra gaser. Detta på grund av den låga antändningsenergin för vätgas. Friktionsenergin vid utsläppsstället kan vara tillräcklig för att antända gasen. Detta gäller särskilt om kanterna vid utsläppet är skarpa eller rostiga.

Skulle antändning inte ske direkt kommer ett gasmoln att bildas. På grund av vätgasens höga diffusionsförmåga kommer dock detta moln att spädas ut snabbare än för andra gaser. Den tid som krävs för att ett jämviktsläge skall uppstå när utsläppet är en turbulent jetström är dock relativt kort, normalt ca 10 – 20 s /10/. Efter denna tid kommer ingen ändring av molnets gasinnehåll att ske, d v s där tillförd mängd gas från utsläppet är lika stor som den mängd som diffunderar bort.

En explosion kan således vara stor även om fördröjningstiden till antändning är relativt liten. Det skall dock påpekas att sannolikheten för att få ett moln med vätgas som exploderar trots allt måste bedömas vara mycket liten.

Vid explosioner i vätgas kan i sällsynta fall detonation ske. Detta kräver dock normalt högre koncentrationer och större antändningsenergi (jämför kapitel 4). En detonation av vätgas utomhus kräver därför mycket stora mängder gas och får anses vara mycket osannolik.

9.3 Konsekvensbedömning

9.3.1 Uppkomst av tryck

Vid konsekvensbedömning av gasexplosioner undersöks i denna rapport endast tryckskador. Vid en explosion kommer även skador att uppstå från värmestrålning, men eftersom det främst är skador på byggnader som är intressant behandlas ej skador av värmestrålning.

Endast fria gasmolnsexplosioner undersöks, d v s gasutsläpp i slutna utrymmen behandlas ej. Vid slutna gasexplosioner blir ofta tryckuppbyggnaden betydligt större än vid fria explosioner, varför metodiken i detta kapitel ej är tillämplig för slutna explosioner.

Tryckuppbyggnaden vid gasexplosioner har ett karakteristiskt utseende, där det nästan momentant efter antändning uppkommer ett maximalt övertryck. Övertrycket kommer därefter att sjunka till ett undertryck och sedan gå tillbaka till normalt lufttryck. Undertrycket är betydligt lägre än övertrycket, men har i gengäld en längre varaktighet.

Vid konsekvensbedömningar av tryck är det inte endast det maximala övertrycket som är intressant utan även övertryckets varaktighet, då en längre exponering ger upphov till större skador. En parameter som ofta används är positiv impulstäthet, vilket är det integrerade värdet av övertrycket under övertryckets varaktighet.

Vid bedömning av skador på byggnader är det viktigt att skilja på två begrepp:

- Infallande tryck är det tryck som en vägg placerad parallellt med tryckvågens front känner av. Det är normalt detta tryck som menas när man talar om tryck från gasexplosioner.
- Reflekterat tryck är det tryck en vägg placerad vinkelrät mot tryckfronten känner av. Detta tryck är större än det infallande trycket och används oftast när skadebedömningar på byggnader skall göras.

För ett givet infallande tryck, P_s , kan det reflekterade trycket, P_r , beräknas enligt följande formel från /9/:

$$\overline{P_r} = 2\overline{P_s} + \frac{(\gamma + 1)\overline{P_s}^2}{(\gamma - 1)\overline{P_s} + 2\gamma} \quad (\text{ekv 9.1})$$

där:

$\overline{P_r}$ = skalat reflekterat övertryck = P_r/P_0

$\overline{P_s}$ = skalat infallande övertryck = P_s/P_0

P_r = reflekterat övertryck [kPa]

P_s = infallande övertryck [kPa]

P_0 = atmosfärstryck (101 kPa)

γ = 1.4

9.3.2 Omsatt energi

Den främsta parametern för att bestämma hur stora övertryck som uppstår vid explosioner är den omsatta energin i gasmolnet. Energin, E , kan beräknas enligt följande formel:

$$E = \chi * V * \rho * \Delta H_c \quad (\text{ekv. 9.2})$$

där:

E = omsatt energimängd [kJ]

χ = andel av utsläppets energiinnehåll som omsätts [-]

V = utsläppets volym [m^3]

ρ = gasens densitet [kg/m^3]

ΔH_c = gasens förbränningsvärme [kJ/kg]

Olika värden på andelen av energimängden i gasen som utnyttjas för att producera tryckvågen χ , anges i litteraturen. Enligt /10/ är denna andel vanligtvis 1 – 10 %. Andra referenser anger 1 - 5 %. U.S. Bureau of Mines rekommenderar en andel på 10 %. Vissa andra referenser anger andelar på 25 – 50 %. Det är dock viktigt att skilja på om det är andelen av det totala utsläppet, eller andelen som ligger inom brännbarhetsområdet i gasmolnet som anges. Dessa andelar kan skilja så mycket som en faktor 10.

De flesta värden som anges ligger dock inte över 10 % av det totala utsläppet. För vätgas som har ett mycket större brännbarhetsområde än de flesta andra gaser bör en större del av utsläppet därför delta i förbränningen.

På grund av den stora diffusionsförmågan kommer dock en stor del av utsläppet att snabbt spädas ut och på så sätt ligga under brännbarhetsområdet. Detta kan möjligtvis motverka att en högre andel används för vätgas.

9.4 Skadekriterier

9.4.1 Människor

Människor är normalt mindre tryckkänsliga än t ex väggar. Det organ som är känsligast för tryck är trumhinnan som brister vid för stora tryckhöjningar. Vid gasmolnsexplosioner bör dock även skador av värmestrålning tas hänsyn till om en fullständig skadebedömning på människor skall göras.

Nedan redovisas några värden från /9/ på infallande tryck och skador hos människor.

Trumhinneruptur (andel drabbade)	Infallande tryck (kPa)	Dödliga skador (andel drabbade)	Infallande tryck (kPa)
1 %	25	1 %	180
10 %	45	10 %	210
50 %	100	50 %	260
99 %	>300	99 %	350

Tabell 9. 2: Samband mellan infallande övertryck och skadenivåer på människor

9.4.2 Väggar

För att bedöma väggars tålighet hos byggnader är det nödvändigt att titta på såväl det maximala övertrycket som övertryckets varaktighet. Den positiva impulstätheten används normalt som ett mått för att väga samman övertryck och varaktighet.

För värden på övertryck och impulstäthet kan samband enligt /9/ sättas upp. Om ekvationen enligt nedan är uppfylld kommer väggen att rasa.

$$\frac{I_c}{I_+} + \frac{P_c}{P_+} \leq 1 \quad (\text{ekv 9.3})$$

där:

I_c = karakteristisk impulstäthet [kPa s]

I_+ = positiv impulstäthet [kPa s]

P_c = karakteristiskt tryck [kPa]

P_+ = maximalt övertryck [kPa]

Karakteristiskt tryck och impulstäthet är specifika för olika typer av väggkonstruktioner. Värden på karakteristiska tryck och impulstätheter för några byggnadstyper och väggar finns i Appendix A.

Normalt används det reflekterade trycket som maximalt övertryck, då det är svårt att säga i vilken vinkel tryckvågsfronten kommer att träffa väggen.

9.4.3 Fönster

Fönster är normalt den känsligast delen i en byggnad vad gäller övertryck. Enligt /9/ går 1 % av fönsterrutorna sönder vid ett infallande tryck på ca 1 kPa, och 50 % vid ett tryck på 10 kPa.

9.5 Beräkningsfall för vätgasfabriken

9.5.1 Förutsättningar

Beräkningar av uppkomna övertryck vid utsläpp av vätgas utförs. Större utsläpp till det fria kommer främst att kunna uppstå vid utsläpp från vätgasförrådet på utsidan av fabriken.

Förrådet utgörs av tre tankar med en sammanlagd volym av 25 m³. Tankarna har ett tryck på 200 bar. Den totala volymen i tankarna blir därför vid atmosfärstryck ca 3800 m³. Innehållet i varje tank motsvarar således ca 1270 m³ eller 106 kg vätgas.

Då det är högst osannolikt att ett utsläpp från alla tre tankarna skulle kunna ske samtidigt, utförs beräkningarna för fallet då all gas från en tank läcker ut.

9.5.2 Beräknade tryck

Beräkning av övertryck har utförts med hjälp av datorprogrammet Chems-plus. Även vätgasens spridningsområde vid ett utsläpp har bestämts med programmet. Reflekterade övertryck har därefter beräknats med hjälp av ekv. 9.1. Övertryckets varaktighet och impulstäthet har bestämts från diagram i /9/.

Andel omsatt energi i gasmolnet har satts till 10 %, men även 25 % beräknas, vilket får anses motsvara en mycket stor andel

I tabellen nedan redovisas beräknade tryck och impulstätheter på olika avstånd från molnets centrum. Reflekterat tryck Utdata från datorberäkningarna finns i Appendix B.

P_s = infallande maximalt övertryck [kPa]

P_r = reflekterat maximalt övertryck [kPa]

t_+ = övertryckets varaktighet [ms]

I_+ = positiv impulstäthet [kPa s]

Avstånd från molncentrum	10 % omsatt energi				25 % omsatt energi			
	P_s	P_r	t_+	I_+	P_s	P_r	t_+	I_+
25 m	69	177	17.8	1.57	102	278	18.5	2.57
50 m	21	46	22.5	0.52	35	81	28.7	1.16
75 m	12	26	26.7	0.34	19	41	34.3	0.71
100 m	5.5	11	28.0	0.16	8.3	17	37.1	0.32
150 m	3.8	7.8	29.4	0.12	6.0	12	38.9	0.24
200 m	2.3	4.7	31.4	0.074	3.3	6.8	39.9	0.14
500 m	0.77	1.6	34.8	0.027	1.1	2.2	46.4	0.051

Tabell 9 3: Beräknade explosionsövertryck på olika avstånd från molnets centrum.

Ovanstående tryck och impulstätheter är beräknade på avstånd från gasmolnets centrum. Molnets geometriska storlek beror av faktorer som utflödes hastigheten vid utsläppet och vindhastigheten.

Beräkningar har därför gjorts för att få en uppfattning om hur stort ett ev gasmoln kan bli. Beräkningarna har utförts för fallen då hela tanken töms under 1 minut (60 s) samt då tanken töms under 5 min (300 s). Den kortare tömningstiden motsvarar således en större utsläppsöppning. I bägge fallen har en vindhastighet på 5 m/s använts.

Figurer över utsläppens utseende i horisontalplanet finns i Appendix B.

Beräkningarna visar att molnets maximala utbredning i vindriktningen blir:

Tömningstid 60 s	70 m
Tömningstid 300 s	30 m

Gasmolnet bör därför ha sitt centrum på halva dessa avstånd, d v s 35 respektive 15 m.

Avstånden i tabell 9.2 ovan bör därför ökas med avståndet till molncentrum. De beräknade spridningsavstånd ger en anvisning om var molncentrum kan befinna sig.

9.5.3 Bedömning av skador

Bedömningen av uppkomna skador görs här för fallet med 10 % omsatt energimängd. Detta får anses vara mer troligt än 25 % - värdet.

Skador på människor bör inte vara dödliga. De uppkomna trycken ligger väl under gränsen för 1 % dödlighet (180 kPa). Tryckskador på trumhinnor skulle dock kunna uppträda nära explosionen. Det skall dock påpekas att här endast undersöks skador av tryck. Skador uppkomna av värmestrålning kan utgöra ett värre hot för människor.

Gränsen där ca 50 % av fönsterrutorna går sönder (10 kPa) ligger på 75 – 100 m.

Skador på väggar i byggnader beror helt på vilken typ av vägg som undersöks.

Nedan görs beräkningar för intagsbyggnad 2 vid Ringhals. Byggnaden är belägen ca 75 m från vätgasfabriken. Data för byggnadens väggar är hämtade från /19/:

- Väggen har bedömts ha det karakteristiska trycket, $P_c = 20$ kPa och karakteristiska impulstätheten, $I_c = 0.10$ kPa s. Reflekterat övertryck på detta avståndet 75 m är 26 kPa och positiv impulstäthet 0.34 kPa s (tabell 9.2).

Enligt ekvation 9.3 blir då:

$$P_c / P_+ + I_c / I_+ = 20 / 26 + 0.1 / 0.34 = 1.1 > 1$$

Enligt beräkningen ovan skall väggen till intagsbyggnaden klara det uppkomna övertrycket. Resultatet ligger dock så nära gränsen att inga definitiva slutsatser kan dras.

På samma sätt kan beräkningar göras för andra avstånd och väggtyper.

10 Sammanfattning av resultat

10.1 Vätgasens egenskaper och risker

Vätgas är på många sätt en gas som skiljer sig mycket från de flesta andra gaser. Några av de egenskaper som är speciella för vätgas är:

- Vätgas är den lättaste av alla gaser. Den diffunderar mycket fort och sprider sig snabbt i luft.
- Vätgas har mycket hög värmeupptagningsförmåga, ca 14 ggr den av vanlig luft.
- Endast vatten bildas vid förbränning.
- Gasen värms upp vid expansion från högre till lägre tryck, tvärtemot andra gaser.
- Vätgas har förmåga att tränga igenom material som är täta mot andra gaser.

Risker vid hantering av vätgas utgörs av möjligheten för uppkomst av gaskoncentrationer som kan leda till brand eller explosion. Några av de egenskaper som medför risker i samband med vätgas är:

- Vätgas har mycket stort brännbarhetsområde och kan antändas i de flesta koncentrationer.
- Antändningsenergin är betydligt lägre än för andra gas/luftblandningar.
- Vid brand är en vätgasflamma i det närmaste osynlig och därför mycket svår att upptäcka.
- Vätgas tillhör de ämnen som kan fås att detonera.
- Vätgas har mycket stor läckagebenägenhet och kan därför läcka ut ur system i större omfattning än andra gaser.

10.2 Mätning av vätgas

På grund av vätgasens speciella egenskaper kan detektering av gasen bli besvärlig. Några av de problem som finns är:

- Vätgas är explosivt i de flesta koncentrationer, varför instrument måste vara explosionssäkra.
- På grund av vätgasens stora spridningsförmåga kan det vara svårt att samla upp gasen innan den späds.
- Detektering av vätgas i inerta miljöer kan medföra problem då många mätmetoder förutsätter att syrgas finns närvarande.

De instrument som finns för detektering av vätgas bygger på ett antal detektionsprinciper. Beroende på vilken typ av instrument som används kommer dessa att ha vissa begränsningar, vilka härrör från de grundläggande principerna. De vanligaste detektionsprinciperna som finns, och några av dess fördelar och begränsningar är:

- **Katalytisk förbränning:** Detta är den vanligaste mätprincipen för brännbara gaser. Sensorer byggda på denna princip är stabila och pålitliga. Metoden kan dock inte mäta över undre brännbarhetsgränsen eller i inerta miljöer.
- **Halvledarteknik:** Användning av halvledare för mätning av vätgas är relativt nytt. Metoden lämpar sig dock väl för detta och kan mäta i hela koncentrationsområdet och även i inerta miljöer.
- **Infraröd absorption:** Denna metod kan ej användas för detektering av vätgas.
- **Elektrokemisk:** Dessa sensorer är relativt snabba. De är dock känsliga för föroreningar. De kan mäta i hela koncentrationsområdet men ej i inerta miljöer.
- **Termisk konduktiv:** Denna metod är främst lämplig för installation i fasta system med konstanta gasflöden. Mätning i inerta miljöer är möjlig men under undre brännbarhetsgränsen är metoden ej lämplig.

10.3 HAZOP-analys, drift

Förutsättningen för Hazop-analysen är att endast konsekvenserna utsläpp av vätgas eller orenheter i gasen undersöktes. Orenheterna kunde bestå av exempelvis för mycket vätgas i syrgasen eller för mycket syrgas i vätgasen. Även andra föroreningar som t ex lut innehåll i vätgasen undersöktes.

En fullständig listning över de punkter som diskuterades och kommentarer till dessa finns i kapitel 7. Nedan följer en sammanfattning över några av de viktigaste punkterna:

- **Hög H₂-halt i syrgasen förekommer.** En trolig anledning till detta är läckage i de packningar som skall skilja vätgasen från syrgasen i elektrolysören. Ett kortare intervall mellan byten av dessa kanske är nödvändigt om halten vätgas fortsätter att öka.
- **Ingen mätning av lutrester i gasen sker.** Skulle lut följa med systemet är det möjligt att det skadar olika system.
- **Vattnet till gasklockan kommer från system 196.** Detta system är kopplat till en hydrofor. Det har tidigare inträffat att tanken blivit luftfylld, vilket kan leda till att luft kommer in i gasklockan. Om möjligt skulle denna tank kunna kopplas bort.
- **Förhöjd O₂-halt vid start förekommer.** Detta kan bero på att deoxon inte har hunnit arbeta in sig.

10.4 HAZOP-analys, avställning

på samma sätt som vid HAZOP-analysen vid drift undersöktes endast konsekvenserna av utsläpp av vätgas eller orenheter i gasen.

En fullständig listning över de punkter som diskuterades och kommentarer till dessa finns i kapitel 8. Nedan följer en sammanfattning över några av de viktigaste punkterna:

- Gränser för tillåtna gaskoncentrationer vid avställning och idrifttagning bör vara enhetliga. Gränserna bör vara 25 % av LEL vätgas vid normal avställning. Skall hetarbete ske bör gränsen vara 5 % av LEL. Gränsen för syrgashalten bör vara 1 % O₂.
- Ändringar bör göras i instruktionerna på LT-sidan efter kompressorn för att hela systemet skall kunna rensplas med kvävgas.
- Samma sak bör göras även för HT-sidan. Spolningen av återcirkulationssystemet på HT-sidan går dock inte att spola på samma sätt som på LT-sidan, eftersom systemet har en något annorlunda utformning. Det är inte tillräckligt att ändra instruktionerna för att klara av detta, utan ett annat tillvägagångssätt behövs.

10.5 Gasmolnsexplosioner

Uppkomst av fria gasmolnsexplosioner där vätgas är inblandat är mycket ovanliga. På grund av vätgasens lättantändlighet kommer de flesta utsläpp att leda till att gasen antänds redan vid utsläppsstället. Något gasmoln kan i så fall inte bildas. Skulle gasen inte antändas omedelbart kommer den att spridas så snabbt att koncentrationen relativt snabbt kommer under undre brännbarhetsgränsen.

För det fall då en gasmolnsexplosion ändå skulle kunna inträffa har beräkningar utförts för att undersöka konsekvenserna av en explosion. Endast konsekvenser av uppkommet övertryck undersöktes.

Beräkningarna visar att konsekvenserna för människor som inte befinner sig i den närmaste omgivningen av fabriken ej utsätts för dödliga skador. Detta gäller dock endast skador uppkomna av tryck och ej av t ex värmestrålning.

För byggnader beror skadorna på, förutom avstånd från explosionen, också på vilken typ av byggnad det rör sig om. Ett förslag till metodik för detta ges i rapporten.

Vid beräkningar på intagsbyggnad 2 vid Ringhals visar det sig att det uppkomna övertrycket vid en gasmolnsexplosion ligger nära den gräns där risk för kollaps av väggen finns

Referenser

- /1/ "Kurs Hydrogen Anleget Ringhals", Kursmaterial, Norsk Hydro, 1997
- /2/ "NASA Lewis Research Center Safety Manual", Chapter 6
- /3/ "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 2nd Edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995
- /4/ Bretherick L., "Handbook of Reactive Chemical Hazards ", 3rd Ed., Butterworths, London, 1985
- /5/ Landström L., "Kort information om gasmätning, bärbara, transportabla, och fast installerade gaslarmsystem", Göteborg, 1990
- /6/ "Val, installation och användning av gasvarnare – Anvisningar", Arbetshandling, CENELEC, 1992
- /7/ Skärdin B., "Gasindikeringsinstrument inom räddningstjänsten", Räddningsverket, 1992
- /8/ Informationsmaterial, Informationsdag Gasmätning, Dräger, Göteborg, 1998
- /9/ Fischer S., m fl, "Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor, Metoder för bedömning av risker", Försvarets Forskningsanstalt, Stockholm, 1995
- /10/ Lees F.P., "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworths & Co Ltd, London, 1980
- /11/ "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Second Edition with Worked Examples", Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992
- /12/ "Utformning av försörjningssystem för gas", Svetskommissionen, Stockholm, 1989
- /13/ Helleberg G., "Arbetsplan för utförande av säkerhetsanalys för vätgassystem i kärnkraftverk och värmekraftverk", Vattenfall rapport PT-19/93, 1993
- /14/ Taylor J.R., "A Background to Risk Analysis – Vol II", Electronics Department, Risø National Laboratory, 1979
- /15/ Zumdahl S.S., "Chemical Principles ", 2nd Ed., D.C. Heath and Company, Lexington, Massachusetts, 1995
- /16/ "AGA Gashandbok", Almqvist & Wiksell Tryckeri AB, Uppsala, 1982
- /17/ "Encyclopedia of Chemical Technology", 4th Ed., John Wiley & Sons, 1995
- /18/ "Encyclopedie des Gaz (Gas Encyclopedia)", L' Air Liquide (Division Scientifique), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976

- /19/ Lindman, S., "Säkerhetsstudie vätgashantering", Rapport Vattenfall Energisystem AB, 1990
- /20/ Medard, L.A., "Accidental Explosions", Ellis Horwood Limited, Hcichester, England, 1989
- /21/ http://www.ttcorp.com/nha/hhs_2.htm (internet)
- /22/ <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/chemsensors> (internet)
- /23/ <http://www.armstrongmonitoring.com/sen-trx.htm> (internet)
- /24/ <http://www.bts.gov/ntl/DOCS/CAP.html> (internet)
- /25/ <http://www.tsi.com/ecs/sensors/opration.htm> (internet)
- /26/ <http://www.draeger.com/english/st/gdt/gds/index.htm> (internet)
- /27/ <http://www.elsevier.nl> (internet)
- /28/ <http://www.dch-technology.com/index.html> (internet)
- /29/ <http://www.clean-air.org> (internet)
- /30/ http://209.21.183.32/fire_technology/firetech_index.html (internet)

Appendix A

Karakteristika tryck och impulstätheter

Appendix A: Karakteristiska tryck och impulstätheter

Byggnader med stomme i platsgjuten betong			
Typ av konstruktion	Våningshöjd [m]	P_c [kPa]	I_c [kPa s]
Bärande ytterväggar av 20 cm betong	3.5	0.2	2.5
Lätta utfackningsväggar (plåtkassetter) i pelarhus	3.5	0.005	0.5
Medeltunga utfackningsväggar (regelstomme och fasadtegelskal) i pelarhus	3.5	0.005	1.0
Cellhus med bärande ytterväggar av 15 cm betong	2.5	0.2	2.5

Byggnader med stomme i monterad betong			
Typ av konstruktion	Våningshöjd [m]	P_c [kPa]	I_c [kPa s]
Hallbyggnad med ytterväggar av 25 cm lättbetongelement (spännvidd 6 m)	6	0.005	0.5
Hallbyggnad med ytterväggar av sandwichelement (betong – isolering – betong), (spännvidd 4 m)	8	0.006	2.8
Pelar – balkstomme med ytterväggar av sandwichelement (betong – isolering – betong)	3.5	0.2	3.1
Elementhus med ytterväggar av sandwichelement (betong – isolering – betong)	2.5	0.2	3.1

Byggnader med stomme i stål			
Typ av konstruktion	Våningshöjd [m]	P_c [kPa]	I_c [kPa s]
Hallbyggnad med lätta ytterväggar (profilerad plåt på stålreglar), (spännvidd 6 m)	6	0.005	0.5
Hallbyggnad med tunga ytterväggar (2 halvstens tegelmurar med mellanliggande isolering)	8	0.006	2.8

Appendix B

Konsekvensberäkningar, gasmolnsexplosioner

Appendix B: Konsekvensberäkningar, gasmolnsexplosioner

Utdata Chems-plus, omsatt energimängd 10 %:

CHEMS-PLUS, V 2.0 PAGE 1
 PROJECT:
 PROBLEM: Sat May 01 18:00:26 1999

Unconfined Vapor Cloud Explosion Model
 =====
 Last Revised Nov. 89

User Inputs:

Molecular weight, (kg/kmol) 2.02
 Yield factor 0.1
 Heat of combustion in (J/kmol) -2.42E+08
 Cloud mass in (kg) 106

Explosion is at ground level

Model Outputs:

Equivalent TNT mass, (kg) 263

Calculated Distance

#	Xc	OPs	OPe
0	270	2.07E+03	0.3
1	179	3.45E+03	0.5
2	138	4.82E+03	0.7
3	106	6.89E+03	1
4	65.7	1.38E+04	2
5	50.4	2.07E+04	3
6	41.9	2.78E+04	4.03
7	36.8	3.45E+04	5
8	24.8	6.89E+04	10
9	20.3	1.01E+05	14.7

Xc: Radial distance to overpressure, m
 OPs: Overpressure, Pa
 OPe: Overpressure, Psi

CHEMS-PLUS, V 2.0

PAGE 2

PROJECT:

PROBLEM:

Sat May 01 18:00:43 1999

Calculated Overpressure

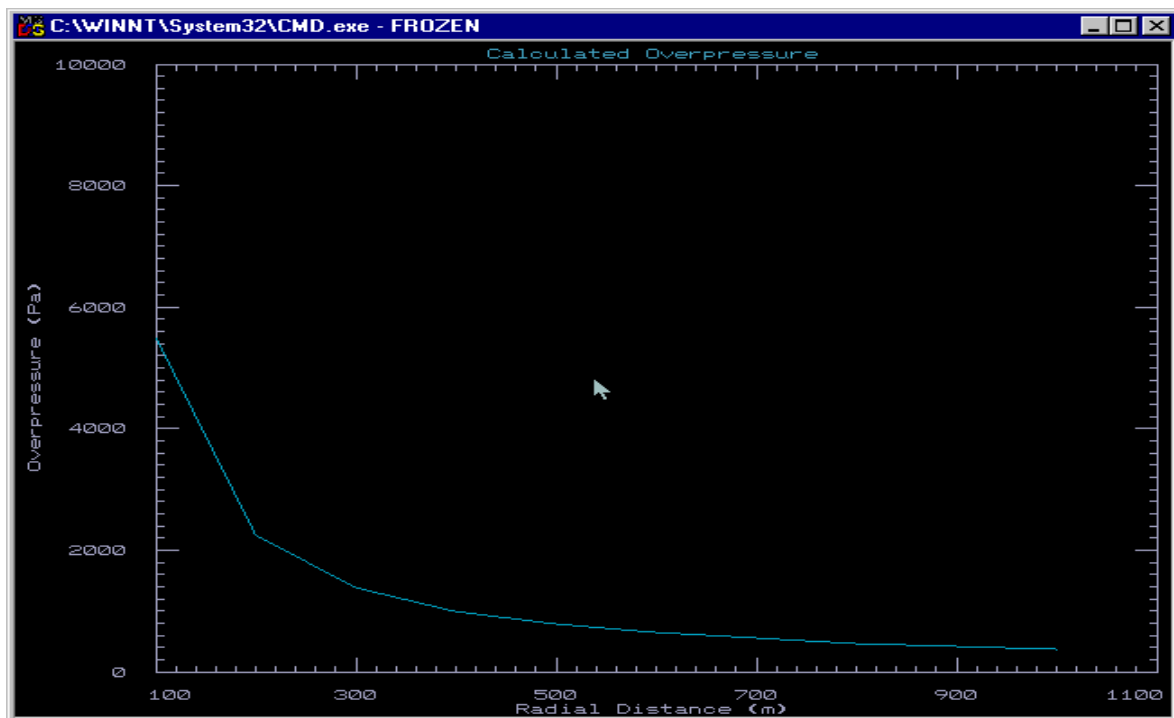
#	Xs	Ys	Rs	OPc
0	100	0	100	5.47E+03
1	200	0	200	2.25E+03
2	300	0	300	1.38E+03
3	400	0	400	990
4	500	0	500	770
5	600	0	600	630
6	700	0	700	533
7	800	0	800	462
8	900	0	900	408
9	1E+03	0	1E+03	365

Xs: Downwind fenceline distance, m

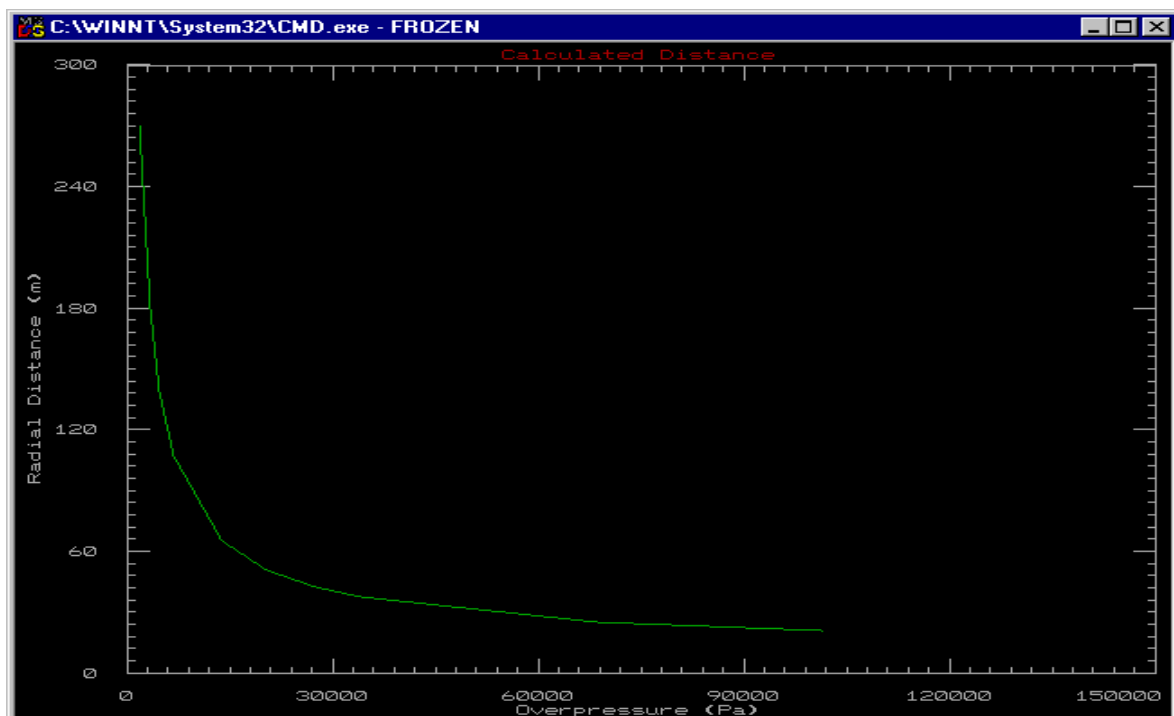
Ys: Crosswind fenceline distance, m

Rs: Radial position, m

OPc: Overpressure



Figur B. 1: Infallande övertryck som funktion av avstånd upp till 1000 m



Figur B. 2: Avstånd som funktion av infallande övertryck upp till 100 kPa

Utdata Chems-plus, omsatt energimängd 25 %:

CHEMS-PLUS, V 2.0 PAGE 1
 PROJECT:
 PROBLEM: Sun May 02 16:58:38 1999

Unconfined Vapor Cloud Explosion Model
 =====
 Last Revised Nov. 89

User Inputs:

Molecular weight, (kg/kmol) 2.02
 Yield factor 0.25
 Heat of combustion in (J/kmol) -2.42E+08
 Cloud mass in (kg) 106

Explosion is at ground level

Note: Cloud mass may not be sufficient to sustain an unconfined
 vapor cloud explosion

Model Outputs:

Equivalent TNT mass, (kg) 658

Calculated Distance			
#	Xc	OPs	OPe
0	366	2.07E+03	0.3
1	243	3.45E+03	0.5
2	188	4.82E+03	0.7
3	144	6.89E+03	1
4	89.1	1.38E+04	2
5	68.4	2.07E+04	3
6	56.8	2.78E+04	4.03
7	49.9	3.45E+04	5
8	33.7	6.89E+04	10
9	27.5	1.01E+05	14.7

Xc: Radial distance to overpressure, m
 OPs: Overpressure, Pa
 OPe: Overpressure, Psi

CHEMS-PLUS, V 2.0

PAGE 2

PROJECT:

PROBLEM:

Sun May 02 16:58:59 1999

Calculated Overpressure

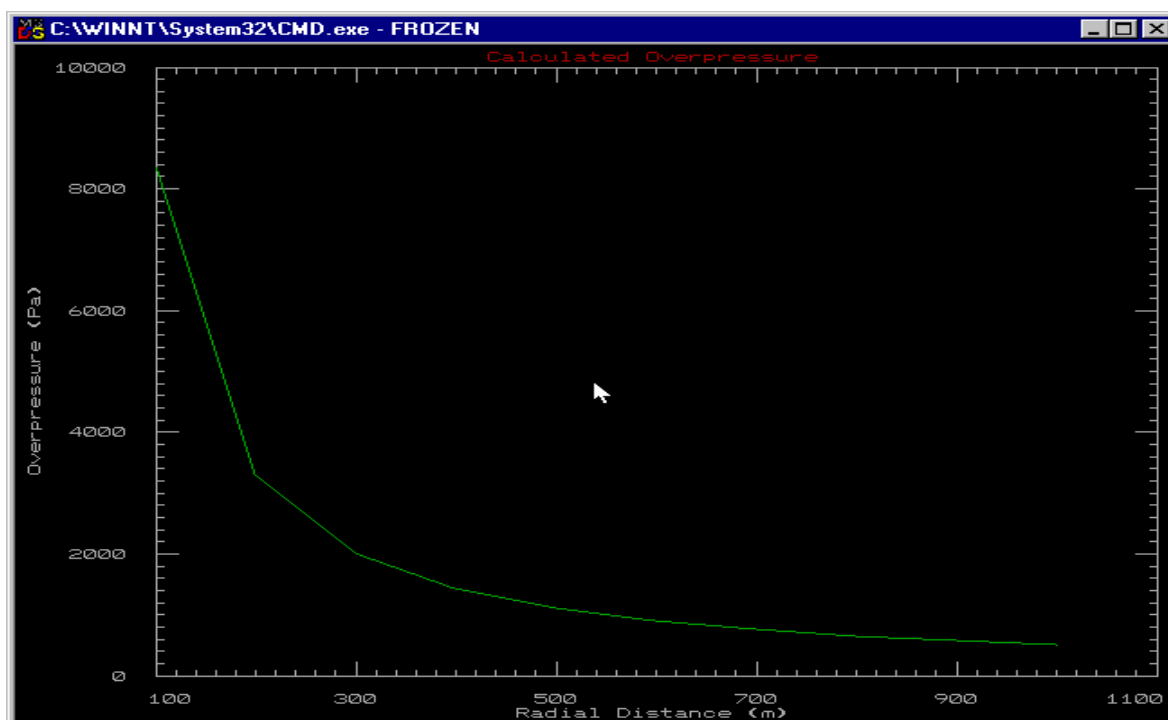
#	Xs	Ys	Rs	OPc
0	100	0	100	8.34E+03
1	200	0	200	3.29E+03
2	300	0	300	1.99E+03
3	400	0	400	1.41E+03
4	500	0	500	1.09E+03
5	600	0	600	884
6	700	0	700	744
7	800	0	800	642
8	900	0	900	565
9	1E+03	0	1E+03	504

Xs: Downwind fenceline distance, m

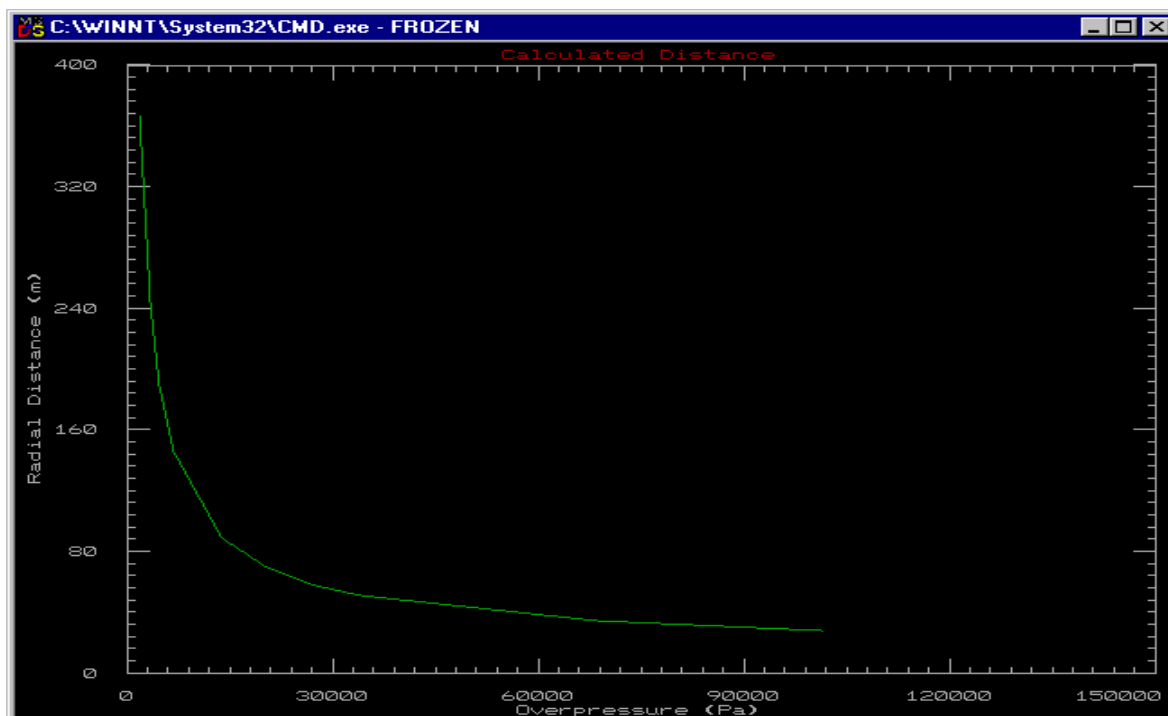
Ys: Crosswind fenceline distance, m

Rs: Radial position, m

OPc

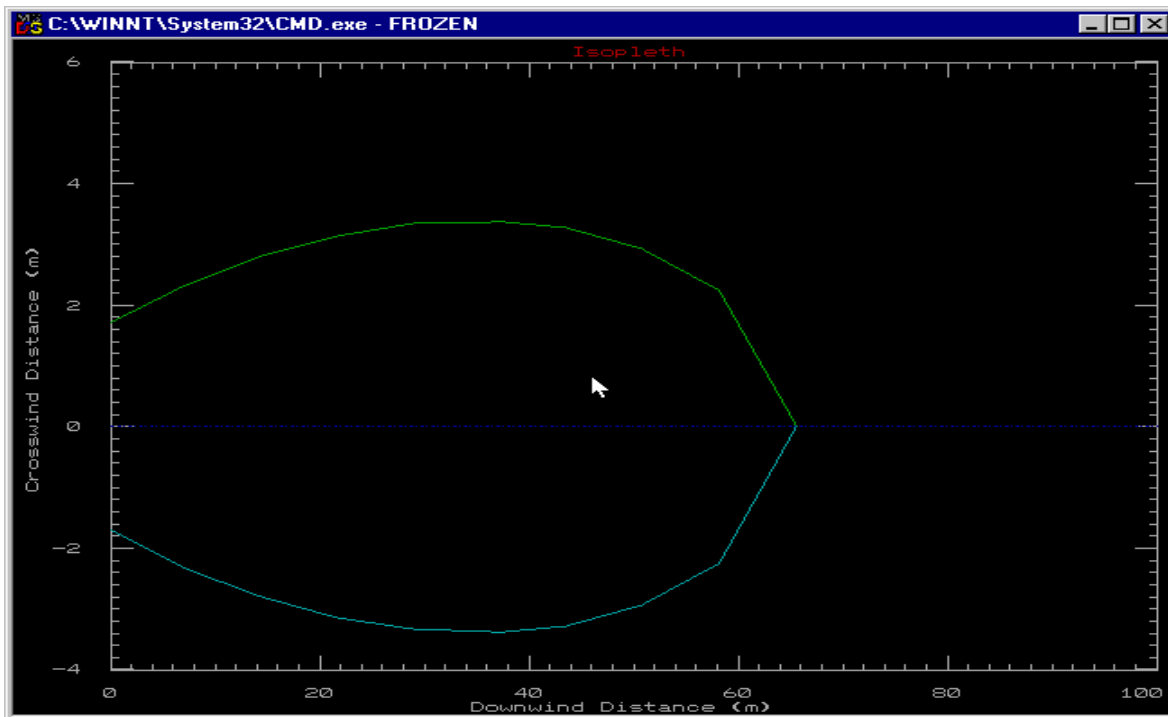


Figur B. 3: Infallande övertryck som funktion av avstånd upp till 1000 m

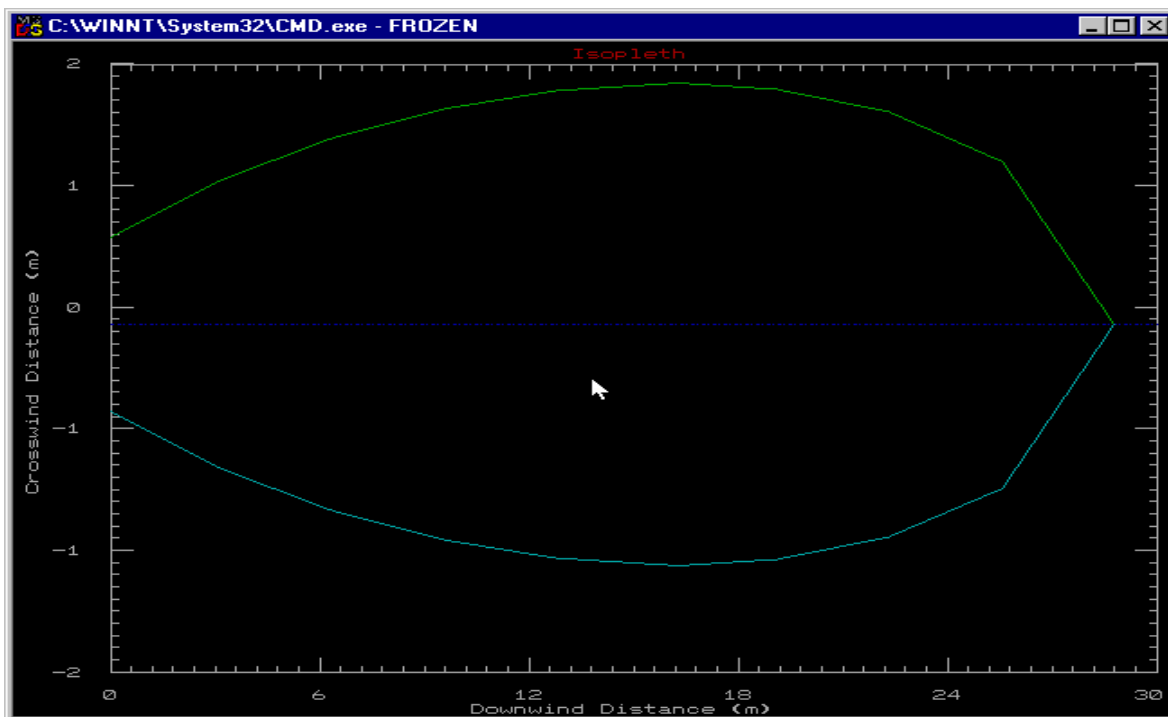


Figur B. 4: Avstånd som funktion av infallande övertryck upp till 100 kPa

Utdata Chems-plus, spridning gasmoln:



Figur B. 6: Gasmolnets spridning i horisontalplanet vid tömningstiden 60 s



Figur B. 5: Gasmolnets spridning i horisontalplanet vid tömningstiden 300 s

Appendix C

Flödesscheman, vätgasfabriken

Appendix D

Översiktsplan, Ringhals