



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Kan det oppstå eksplosjons farlige naturgass/luft blandinger ved lekkasje i gassrør i fyrrom?



Hovedprosjekt utført ved Høgskolen Stord/Haugesund - Avd. for ingeniørfag

Studieretning: Brannsikkerhet

Av: Hans-Tore Johannessen
Morten Svandal

Kandidatnummer: 61

Kandidatnummer: 58

Haugesund

2003



Høgskolen Stord/Haugesund
Avdeling for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel Kan det oppstå eksplosjons farlige naturgass/luft blandinger ved lekkasje i gassrør i fyrrom?		Rapportnummer
Utført av Hans-Tore Johannessen og Morten Svandal		
Linje Sikkerhet		Studieretning Brann
Gradering Åpen	Innlevert Dato 30.04.03	Veileder ved HSH Leiv Anfin Drange og Geri Wagner
Oppdragsgiver Gasnor ASA		Kontaktperson hos oppdragsgiver Nils Jarle Lindtner

Rapporten er skrevet for Gasnor ASA for å dokumentere sikkerheten i fyrrom ved bruk av naturgass. Det er i rapporten sett på gasslekkasjer i koblinger på rørsystem i fyrrom som har naturgassbrenner. Praktiske forsøk er brukt for å dokumentere hvor stor en gasslekkasje må være for å oppnå naturgasskonsentrasjoner over den nedre eksplosjonsgrensen. Forsøk viser at det er liten sannsynlighet for å oppnå eksplosiv atmosfære i fyrrom. Det blir også vist at elementer i fyrrom påvirker oppbyggingen av gasskonsentrasjon.



FORORD

Rapporten er skrevet som hovedprosjekt ved 3-årig brannsikkerhetsingeniørstudiet i Haugesund. Hovedprosjektet blir vektet fire vekttall.

Vi var først og fremst opptatt av å lage et prosjekt der praktiske forsøk stod sentralt. Gjennom Alf Reidar Nilsen jr. kom vi i kontakt med Nils Jarle Lindtner fra Gasnor ASA, som gjerne ville ha dokumentasjon på sikkerheten ved bruk av naturgass som energikilde. Dokumentasjonen er ment å brukes opp mot eksterne kontakter.

Rapporten egner seg best i farger.

Vi ønsker å rette en spesiell takk til:

Leiv Anfin Drange	Intern veileder
Geri Wagner	Intern veileder
Nils Jarle Lindtner	Ekstern Veileder
Arjen Kraaijeveld	HSH
Alf Reidar Nilsen jr.	HSH
Ferkingstad og Alsaker VVS	
ResQ AS	

Haugesund 30.4.2003

Hans-Tore Johannessen

Morten Svandal

SAMMENDRAG

Rapporten er skrevet for Gasnor ASA for å dokumentere sikkerheten i fyrrom ved bruk av naturgass. Naturgass kan brukes til oppvarmingsformål i industri, bygg og bolig, for eksempel skoler, sykehus og hoteller. Slike bygg benytter en naturgassbrenner for sentralvarme. Brenneren befinner seg i fyrrom, og mottar gass gjennom rørsystem. Det er i rapporten sett på hvor stor en lekkasje blir dersom en kobling på rørsystemet inne i fyrrommet ikke er helt tilskrudd, og det er sett på hvor stor lekkasjen må være for å oppnå eksplosjonsfarlig atmosfære i fyrrommet. Naturgassen er lettere enn luft, noe som gjør at den vil stige mot taket ved en eventuell lekkasje. Et fyrrom har noen forhold som kan gjøre at naturgassen ikke bare vil legge seg lagvis under taket, blant annet ventilasjonsåpninger og overskuddsvarme fra brenner. Ved oppnådd likevekt mellom naturgass og luft skal det kartlegges hvordan konsentrasjonen av gass varierer i fyrrommet. Forsøkene ble utført i en konteiner der forholdene i et fyrrom ble gjenskapt.

Resultatene viser at det kan strømme store mengder gass gjennom en dårlig tilskrudd gjengekobling. Ved gjengekobling som er avskrudd en omdreining vil en kunne få lekkasjerate på 10 l/min, mens en kobling som er en kvart omdreining fra å være helt avskrudd kan gi lekkasjerate på 70 l/min. Det ble vist gjennom forsøk at med de ventilasjonsforhold som er påbudt for fyring med gassformig brensel, må lekkasjearealet ikke overstige $12,6 \text{ mm}^2$, som tilsvarer et sirkulært hull med diameter 4mm, for å forhindre dannelse av eksplosjonsfarlig konsentrasjon av naturgass. Omregning av forsøksresultatene gav en lekkasjerate på 62 l/min ved dette arealet, som tilsvarer en kobling som er mellom en halv til en kvart omdreining fra å være helt avskrudd. Det er liten sannsynlighet at en gjengekobling åpnes så mye ved vanlig drift og vedlikehold. Konsentrasjonskartet av naturgass viser at innluftåpning og overskuddsvarme fra brenner vil skape sirkulasjon og tynne ut gassen hvor disse er plassert. Der ingen kilde bidrar til sirkulasjon vil gassen legge seg lagvis under taket, med fallende konsentrasjon nedover mot gulvet.



INNHOLDSFORTEGNELSE

FORORD.....	3
SAMMENDRAG.....	4
INNHOLDSFORTEGNELSE.....	5
1. INNLEDNING.....	6
1.1. Naturgass.....	6
1.2. Gasnor ASA.....	7
1.3. Bakgrunn.....	7
1.4. Problemstilling.....	7
1.5. Kort forklaring om forhold i fyrrom.....	7
2. PRESENTASJON AV FORSØK.....	8
2.1. Scenario.....	8
2.2. Innledning.....	8
2.3. Utstyr.....	8
3. DELFORSØK.....	9
3.1. Lekkasjerate ved gjengekobling.....	9
3.2. Utførelse av delforsøk.....	10
3.3. Resultater.....	11
3.4. Usikkerheter.....	12
4. HOVEDFORSØK.....	13
4.1. Beskrivelse av hovedforsøk.....	13
4.1.1. Ventilasjonsforhold.....	13
4.1.2. Kontaineren.....	13
4.2. Forutsetninger og antagelser.....	15
4.2.1. Antagelser.....	15
4.2.2. Forutsetninger.....	16
4.3. Utførelse hovedforsøk.....	16
4.4. Resultater.....	16
4.4.1. Likevekt og LEL.....	16
4.4.2. Konsentrasjonskart.....	20
4.5. Usikkerheter.....	21
5. ARBEIDSPROSESSEN.....	22
6. DISKUSJON.....	23
7. KONKLUSJON.....	25
8. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID.....	26
OVERSIKT TABELLER, GRAFER OG BILDER.....	27
REFERANSER.....	28
VEDLEGG.....	29

1. INNLEDNING

1.1. *Naturgass*

Naturgass er dannet av plante- og dyrerester som har vært utsatt for høyt trykk og høy temperatur gjennom millioner av år. Naturgass er ikke giftig. Siden naturgass er letter en luft vil den stige opp ved en eventuell lekkasje.

Månedsanalyse av tørrgass fra Draupner til Kårstø for januar 2003 viser at naturgassen brukt av Gasnor inneholder: Metan ca 86 %, Etan 8 %, Propan 3 % og flere andre gasser i mindre mengder, se [vedlegg 1](#). I tabell 1 finnes en del fakta om naturgass.

Naturgass kan brukes i boliger der det kan dekke 70-75% av energi behovet, til for eksempel oppvarming, varmtvann, matlaging og grill. Gassen kan brukes til oppvarmingsformål i industri, bygg og bolig, for eksempel skoler, sykehus og hoteller. I kjøretøy som biler og busser kan naturgass brukes som drivstoff [1].

I Norge er naturgass lite brukt i forhold til i andre deler av verden og det har dermed vært lite forsket på konsekvenser ved lekkasjer i leiligheter eller i andre bygg. At det kan skje gasslekkasjer og at det ved enkelte tilfeller kan føre til katastrofer er blitt bevist ved ulykker. 2002: den 20. august omkom 8 personer etter at en gasslekkasje antente i en boligblokk i Moskva [2].

1998: Et naturgassprosesseringsanlegg eksploderte og kom i brann i Longford, Victoria i Australia. Anlegget var eid av Esso og bygd i 1969. 2 mennesker mistet livet og 8 ble skadd.

1984: Et naturgasslager tilhørende Pemex i Mexico eksploderte. 452 mennesker ble drept, 4248 ble skadet og mer enn 31000 ble husløse [3].

Tabell 1 – Fakta om naturgass [4]

Fakta om naturgass	
Fysisk tilstand	Gass
Farge	Fargeløs
Kokepunkt	-162 °C
Tetthet i væskefasen (LNG)	450 kg/m ³ (ved 1 atm og -162 °C)
Tetthet til gassen	0,80 kg/m ³ ved 15 °C (vedlegg 1)
Nedre brennverdi gassfase	37,5 MJ/Sm ³ = 10,4 kWh/Sm ³ =10,9 kWh/nm ³
Nedre brennverdi på massebasis	13,0 kWh/kg
Nedre brennverdi i væskefase (LNG)	5,8 kWh/liter
Innhold av metan	82-93% (mol)
Selvantennelses temperatur	540 °C
Ekspløsjongrensener	4,7-14,7% volum i luft
Forklaringer	
LNG (Liquefied Natural Gas)	Flytende naturgass nedkjølt til -162 °C
1 Sm ³	1 m ³ ved 1 atm og 15 °C
1 nm ³	1 m ³ ved 1 atm og 0 °C
1 Sm ³	0,95 nm ³

1.2. Gasnor ASA

Gasnor er en bedrift på Karmøy i Rogaland med 15 ansatte som ble stiftet i 1989 og ble operativ i 1994. Formålet med bedriften er å distribuere og tilby naturgass til innenlandske brukere. Det foreløpige distribusjonsnett er på Karmøy og Haugesund kommuner. Dette strekker seg over 50 km gassledning. Bedriften leverer også naturgass til busser og biler i Haugesundområdet. [1]

1.3. Bakgrunn

Gasnor ASA hadde ingen dokumentasjon på hvordan naturgass ville opptre hvis den lakk ut i et fyrrom der varmestruer påvirker forholdene. Spørsmålet var om naturgassen ville skape eksplosjonsfarlige blandinger selv ved små lekkasjer. Som leverandør av naturgass ønsket bedriften å få testet og dokumentert sikkerheten ved fyrrom som benytter deres produkt.

1.4. Problemstilling

Hva skjer i et fyrrom der det oppstår en gasslekkasje? Vil det nå en eksplosiv blanding eller vil gassen stige opp til utluftåpning og forsvinne ut? En brenner i rommet vil fungere som en varmekilde. Vil varmen fra brenneren gjøre at gass og luft blir bedre blandet på grunn av oppdrift? Det tas utgangspunkt i en kobling som løsner slik at gass siver ut i et fyrrom.

- Hvor mye gass kan da komme ut?
- Hvor lang tid tar det før likevekt oppstår ved lekkasjer av forskjellig størrelse?
- Hvordan er likevekten i forhold til nedre eksplosjons grense (LEL) ved forskjellige lekkasjerater?
- Hvordan legger gassen seg i rommet? Lag et konsentrasjons kart over gassens konsentrasjon, hvor starter LEL og er dette et stort område ved likevekt?

Likevekt inntre når naturgass-/luftblandingen har stabilisert seg i konteineren. I prosjektet er det kun fokusert på gasskonsentrasjoner opp til 4,7 % naturgass i luft, som er nedre eksplosjonsgrense. Videre i rapporten er dette oppgitt som % av LEL, der 100 % tilsvarer nedre eksplosjonsgrense.

1.5. Kort forklaring om forhold i fyrrom

I fyrrom står en gassbrenner som fungerer som sentralvarmer i bygg som benytter naturgass til oppvarming. Gassen kommer inn i rør på den ene vegg, her fra går den gjennom avstegningsventiler, avluftningsventil og gassmåler før den kommer inn i brenneren. Fyrrom har frisklufttilførsel nede på en av veggene og en ventilasjonsåpning høyt oppe på motsatt vegg for å ventilere ut luft og gass ved en eventuell lekkasje. Brenneren gir fra seg en del overskuddsvarme som stiger, dette kan føre til sirkulasjonsstrømmer som oppfører seg forskjellig fra det antatte om at den legger seg ved taket og ventileres ut. Den lette gassen vil stige til taket der den møter varmestruene fra brenneren. Dette samtidig med at det er en jevnt høy temperatur i rommet som ligger rundt 30° C og med en frisklufttilførsel som skaper en trekk i rommet, gir usikkerhet angående oppbyggingen av gasskonsentrasjon. Se [vedlegg 2](#) for skisse av et fyrrom. Ved bruk av naturgass blir fyrrommet berørt av DBE's regelverk [5] og [6].

2. PRESENTASJON AV FORSØK

2.1. Scenario

Det tas utgangspunkt i et fyrrom med gulvareal 14,4 m², og brenner av størrelse 500 kW med forbrenningsvifte. Om sommeren gjør temperaturen utendørs at brenneren ikke trenger forbrenne naturgass kontinuerlig. Dette gir driftstans på opptil to timer. I denne perioden vil forbrenningsluft være stillestående, og det er kun termisk oppdrift som driver sirkulasjon og ventilasjon i rommet. I en slik driftstansperiode oppstår en lekkasje i en gjengekobling, og det siver gass ut i rommet.

2.2. Innledning

Det ble gjennomført to forsøk; et delforsøk og et hovedforsøk. Begge forsøk ble gjort på ResQ's brannfelt på Bleivik. I et fyrrom blir det benyttet rustfrie rør med ytre diameter på 33,7 mm og gods tykkelse på 2 mm, gasstrykket fra regulatoren og inn i røret er på 0,1 bar. Med dette utstyret ble utslippsraten gjennom sirkulære hull målt. Dette ble satt opp mot utslippsraten som ble funnet ved lekkasje i løse gjengekoblinger på samme røret. Poenget med å bore sirkulære hull er at disse egner seg bedre i videre forsøk og er enklere å gjenskape. Disse to målinger ble gjort som delforsøk. Resultatene fra delforsøket ble brukt i hovedforsøket. En konteiner ble brukt for å simulere et fyrrom, med de forholdene et fyrrom har. En konstant utslippsrate av naturgass ble sluppet inn i konteineren og gasskonsentrasjonen ble målt over tid og på flere steder i konteineren. Hovedmålet med forsøket var å fastslå hvor stor utslippsraten måtte være for å få dannet en eksplosiv gassky av betydelig størrelse. På forhånd er det gitt at på ett punkt rundt gasslekkasjen vil gass/luftblandinga være i eksplosjonsområdet til naturgass. Akkurat ved en lekkasje kommer det til å være for høy gasskonsentrasjon til at det er fare for eksplosjon. Gassen blander seg med luft og konsentrasjonen blir tynnere enn eksplosjonsområdet, men i mellom for tykk og for tynn konsentrasjon, må et lite sjikt være i eksplosjonsområdet til naturgass. Eventuell antennelse av dette sjiktet vil danne en flamme som ligger og brenner over lekkasjen, og som gjør at gassen blir forbrent, og det dannes ikke-antennelige produkter.

2.3. Utstyr

Utstyr som er benyttet under forsøkene:

- Konteiner
- Naturgass på flaske fra Gasnor
- Regulator 1 regulerer trykk fra flaske ned til 4 bar
- Regulator 2 regulerer trykk fra 4 bar ned til 0,1 bar. Regulator Type 133, Actuator Body DN 25
- Oljeradiator uten termostat 1000 W
- Oljeradiator uten termostat 700 W
- Rotameter for avlesning av gasstrøm (liter per minutt) ved 20° C (i utgangspunktet for luft, men strømmingen kan regnes om for andre gasser)
- Rør med 33,7 mm ytre diameter og 2 mm gods tykkelse for å føre gassen inn i konteineren

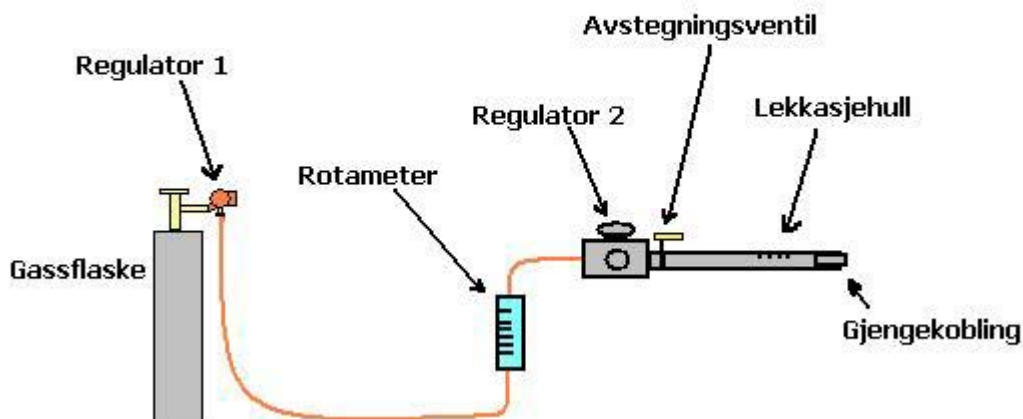
- Ex - godkjent metanmåler som registrerer % av LEL (måleren er godkjent for bruk i eksplosjonsfarlige naturgass/ luft blandinger)
- 4 meter gummislange med indre diameter 10mm
- Tau og trinser for å bevege metanmåler
- Gjennomsiktig vegg bestående av treramme og plast
- Kikkert for avlesing av metanmåler
- To stk arbeidssoler for å lyse inn i konteineren fra utsiden

3. DELFORSØK

3.1. *Lekkasjerate ved gjengekobling*

Forsøket ble gjort for å finne raten av gass som kommer ut ved lekkasje i en gjengekobling og finne sirkulære hull som tilsvarer disse lekkasjene. Poenget med å måle ratene gjennom lekkasje i gjengekoblingene var for å kunne si noe om hvor langt en kobling må være avskrudd for at mengden gass som kommer ut skaper farlige forhold.

For å kunne finne størrelser på lekkasjer i gjengekoblinger ble det satt opp et enkelt forsøk der en gassflaske med naturgass ble festet til utstyr tilsvarende det som blir benyttet i et fyrrom. På gassflasken var regulator 1 koblet til, den senket trykket fra det som er på flasken ned til 4 bar. Fra regulator 1 gikk gassen gjennom gummislange med en indre diameter på 10 mm til et rotameter som målte gasstrømmen gjennom slangen. Rotameteret var plassert vertikalt i vater. Fra rotameteret gikk det en tilsvarende slange til regulator 2 som reduserte trykket ned til 0,1 bar. På regulator 2 var det en avstegningsventil som kunne brukes for å ikke slippe ut unødvendig gass mellom forsøkene, men fremdeles holde trykket oppe. Videre på regulator 2 var det festet et rør med 33,7 mm ytre diameter og 2 mm godts tykkelse, se bilde 1 og 2 for oppsett av forsøk. På enden av røret var det festet en kobling, der gjengene var dekket med gjengeteip for å gjøres mest mulig tett. På dette røret var det også boret hull med størrelsene 1mm, 2 stk 1,5mm, 2 mm, 2,5mm, 3mm, 3,5mm, 4mm, 4,5mm, 5mm, se bilde 3.



Bilde 1: Skisse over oppsett i delforsøk



Bilde 2: Viser oppsettet under delforsøket. Bildet viser ikke rustfritt rør som var koblet til regulatoren



Bilde 3: 33,7 mm rustfritt rør med hull

3.2. Utførelse av delforsøk

Forsøkene ble gjort ved at person 1 justerte størrelsen på lekkasjen ved å vri på gjengekoblingen. Når gasstrømmen stabiliserte seg leste person 2 av resultatene ved hjelp av rotameteret. Avlesningene ble gjort på faste omdreiningspunkter som startet fra avskrud til helt på, antall omdreininger og lekkasjerater var som vist i tabell 2. Det ble deretter boret hull i røret i størrelser fra en millimeter opp til fem millimeter, med en halv millimeter intervall. Disse hullene ble brukt til å finne lekkasjerater som var lett å bruke i hovedforsøket og som ved en senere anledning ville være lett å gjenskape. Strømningsraten gjennom hullene ble også lest av ved hjelp av et rotameter. I tillegg til å lese av raten gjennom enkelt hull ble det gjort en del forsøk med kombinasjoner av hull for å kunne sammenlikne strømmen gjennom forskjellige arealer. Rotameteret som ble benyttet under forsøkene måler volumstrøm (l/min), der de oppgitte verdiene gjelder for luft. Alle resultatene er derfor omregnet til volumstrøm metan, se [vedlegg 3](#).

3.3. Resultater

Lekkasjeratene gjennom løse gjengekoblinger er presentert i tabell 2. Mengden gass som slippes gjennom en gjengekobling kan påvirkes av press fra motstående rør. I forsøket ble det ikke utøvet press på koblingen.

Tabell 2 – Lekkasjerate i løs gjengekobling, [vedlegg 3](#)

Omdreining	Strømning [l/min]
-5	0
-4,5	0
-4	10
-3,5	16
-3	20
-2,5	22
-2	28
-1,5	20
-1	35
-0,75	28
-0,5	43
-0,25	70
0	over 100*

* = ikke målbar

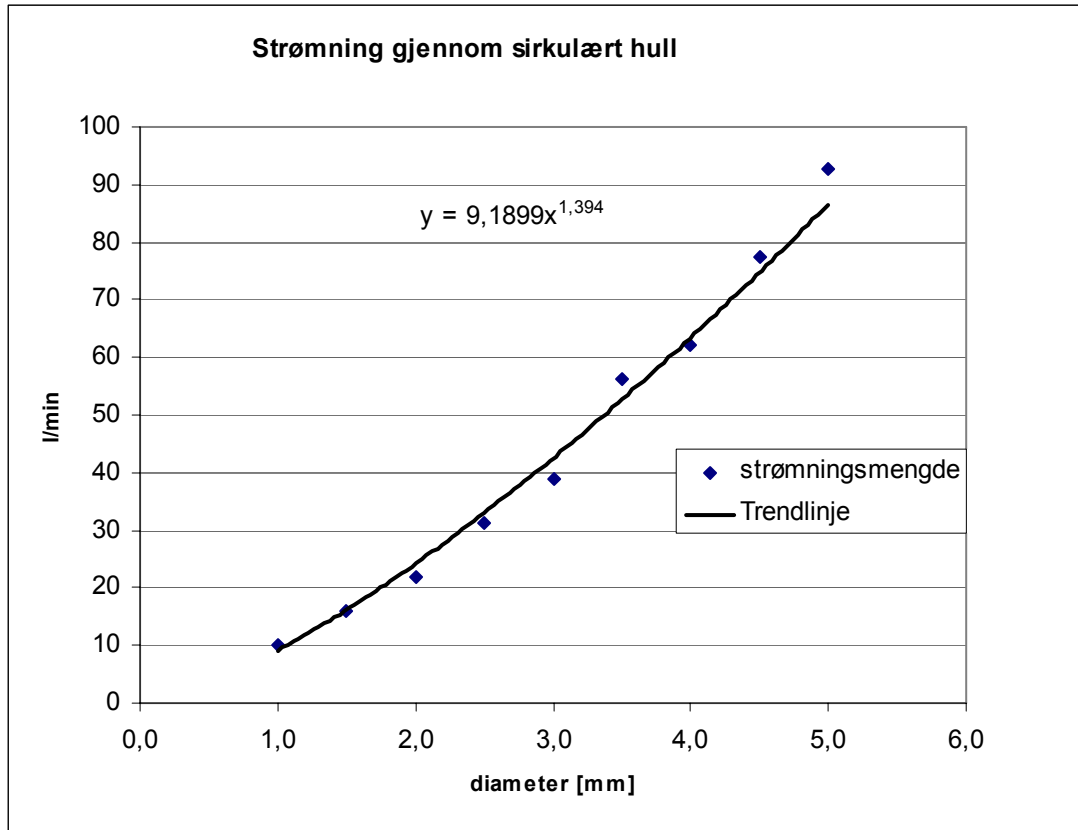
Ved omdreining lik null, er koblingen helt av. -0,5 omdreining er en 180° rotasjon med klokken.

Lekkasjeratene som ble funnet ved strømning gjennom sirkulære hull i røret er presentert i tabell 3, og i graf 1. Hensikten med disse resultatene er å få en mer stabil lekkasje til bruk i hovedforsøket. Lekkasjeraten følger tilnærmet formelen $y=9,1899x^{1,394}$, der y er gasstrømning i liter per minutt og x er diameter på sirkulært lekkasjehull, se [vedlegg 3](#), i det spekteret forsøkene omfatter.

Tabell 3 – Lekkasjerate gjennom sirkulære hull, [vedlegg 3](#)

Diameter [mm]	Strømning [l/min]
1,0	10
1,5	16
2,0	22
2,5	31
3,0	40
3,5	56
4,0	62
4,5	77
5,0	93

Graf 1: Grafisk fremstilling av mengden gass gjennom hull med ulike diameter



Det var ikke mulig med det tilgjengelige utstyr å måle utslippsraten ved fullt avbrett på røret da denne strømmen var langt større enn den skalaen rotameteret strakk seg over. Et anslag av dette utslippet vil være ganske unøyaktig da diameteren på lekkasjehullet ved fullt avbrett er på 29,7 mm mens diameteren på det største hullet som det var mulig å foreta målinger på var 5 mm. Ekstrapolering av de målte verdier gir utslippsrate på 604 l/min.

3.4. Usikkerheter

Forhold som kan ha påvirket resultatet av forsøkene:

- De sirkulære hullene var ikke plassert på samme sted på røret
- Hullene ble boret for hånd, og kan avvike fra normalaksen på røret. Det vil i praksis si at hullene kunne få større diameter ved feil vinkling av boret
- Rotameteret har en ganske grov skala med intervall på 2 l/min. Det vil si at lekkasje målingene ble rundet opp eller ned ved enkelte avlesninger. For eksempel en måling som kanskje var 10,2 l/min ble lest som 10 l/min
- Naturgassen ble antatt å ha metanegenskaper ved omregning fra luftstrøm til gasstrøm

4. HOVEDFORSØK

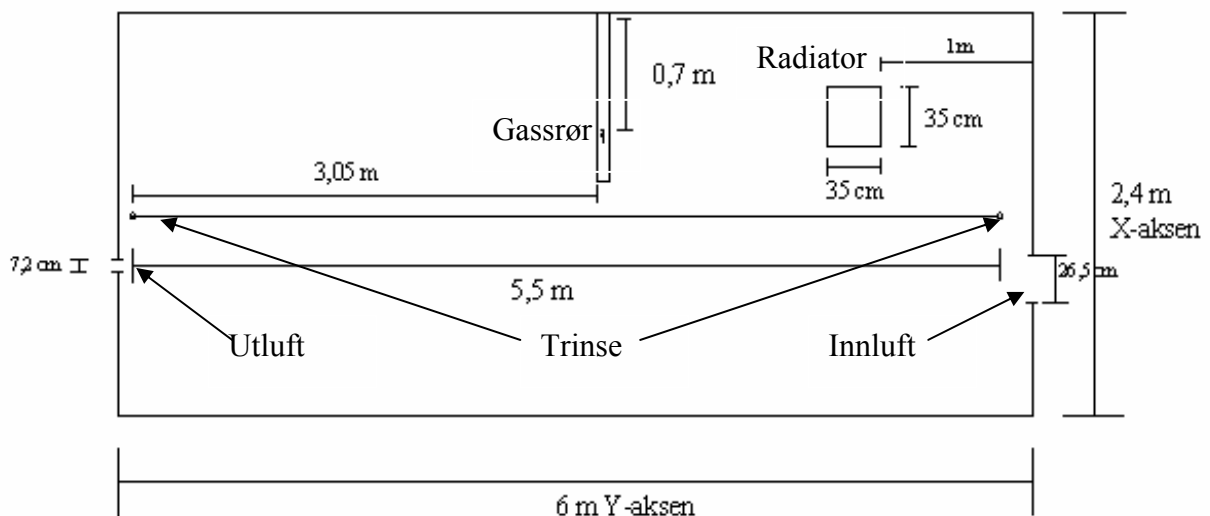
4.1. Beskrivelse av hovedforsøk

I hovedforsøket ble gass sluppet inn i en konteiner som simulerer et fyrrom, i henhold til scenariet beskrevet i 2.1. Målet med forsøket var å finne hvor stor en lekkasje må være for å oppnå eksplosjonsfarlig blanding i fyrrom. Resultatene kommer fra avlesing av metanmåler.

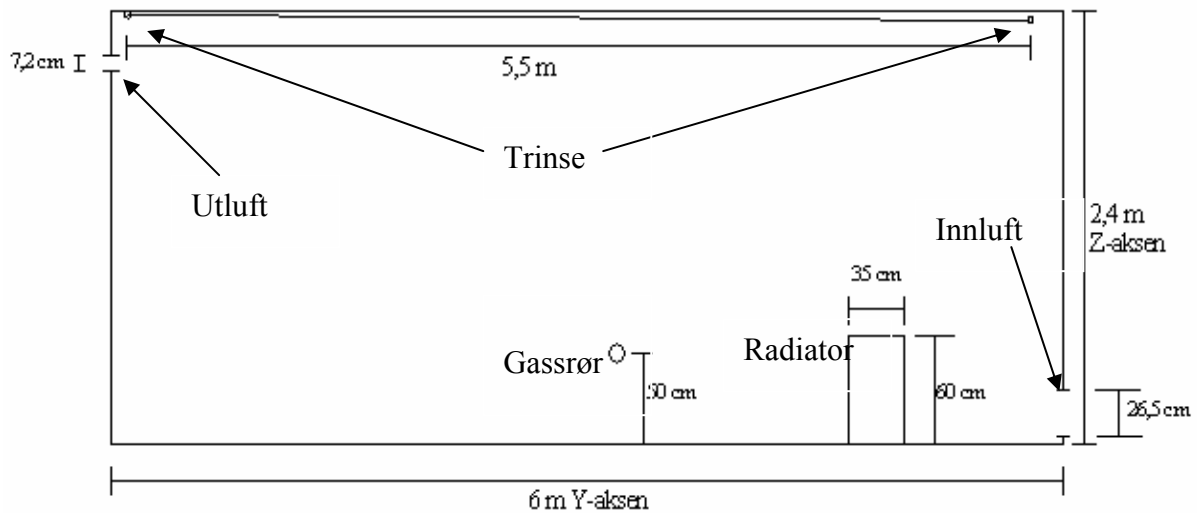
4.1.1. Ventilasjonsforhold

Ventilasjonsforholdene i et fyrrom avhenger av arealet på gulvet og størrelsen på brenneren i rommet. Beregning av ventilasjonsåpninger ble gjort etter veiledning og anbefalinger fra Ferkingstad og Alsaker VVS, se [vedlegg 4](#). I konteineren som ble brukt i forsøket var gulvarealet på $14,4 \text{ m}^2$, dette gav inn- og utluftåpninger som begge måtte være på 51 cm^2 . I tillegg er det et krav om at en ovn som har forbrennings effekt på 500 kW med forbrenningsluft vifte trenger en åpning for forbrenningsluft som skal være 750 cm^2 . Forbrenningsluftåpningen kan slås sammen med en av de andre ventilasjonsåpningene. Det ble valgt å slå sammen innluftåpning og forbrenningsluftåpningen, denne fikk da et areal på 700 cm^2 . Den ble ikke 750 cm^2 da arealet av utluften kunne trekkes fra, se [vedlegg 5](#).

4.1.2. Konteineren



Bilde 4: Konteiner sett ovenfra



Bilde 5: Konteiner sett fra siden

Det ble benyttet en konteiner med størrelsene 2,4m x 2,4m x 6 m, se bilde 4 og 5 for oppsett i konteineren. For å gjennomføre flest mulig målinger på ulike posisjoner i konteineren ble det satt opp ett tau/trinse- system for å bevege metanmåleren i et vertikalt todimensjonalt plan langs sentralplanet i rommet. Sentralplanet var et plan som lå mellom kortveggene i konteineren med lik avstand til begge langveggene. Den ene kortveggen ble erstattet med en plastvegg for å kunne foreta avlesinger av metanmåleren på sikker avstand. Radiatorene ble plassert en meter innenfor plastveggen med støpslene på utsiden for å kunne kutte strømtilførselen på en enkel måte. Radiatorene ble plassert like ved sentralplanet for ikke å krysse metanmålerens bevegelsesplan. Gassflasken og regulatoren ble plassert på utsiden av konteineren for raskt å kunne stenge av gasstilførselen. Selve lekkasjen ble plassert 2,85 meter fra plastveggen, 50 cm over gulvet, og fra 70 til 79 cm fra langsideveggen, alt etter hvor stor lekkasje som ble benyttet i de forskjellige målingene. Innluftåpningen ble skåret ut i plastveggen 4 cm over gulvet, og med senter 40 cm fra sentralplanet. Utluftåpning ble plassert på motsatt kortside, 30 cm fra taket, 30 cm fra sentralplanet. Se tabell 4 for størrelser og avstander i konteineren. For å bedre lysforholdene inne i konteiner og lette avlesning av metanmåleren ble det plassert to stykker arbeidssoler på utsiden av plastveggen ved innluftåpningen. Alle huller, sprekker og andre typer åpninger ble tettet ved hjelp av plast og teip. Plasseringen av de ulike elementene var ønskelig å ha langs sentralplanet, men var ikke praktisk gjennomførbart på grunn av ulike forhold. Ovnene og gassrøret kunne ikke plasseres slik at de dekket metanmålerens lavere posisjoner. Utluftåpning måtte skjærebrennes ut der det var mest praktisk gjennomførbart, der metallet var tynnest. Dørene var forsterket på sentralplanet. For detaljert beskrivelse og bilder av oppsett, se [vedlegg 6](#).

Tabell 4 – Størrelser og avstander

Beskrivelse:	Arealer
Innluftåpning	700 cm ²
Utluftåpning	51 cm ²
Overflate ovner	1225 cm ²
	Volumer
Konteiner	34,56 m ³
	Avstander
Trinse til trinse inne i konteiner	5,5 m
Trinse til plastvegg	21 cm
Trinse ved plastvegg til tak	5 cm
Trinse til metallvegg	10 cm
Trinse ved metallvegg til tak	2 cm
Gulv til nedre kant på innluftåpning	4 cm
Gulv til øvre kant på innluftåpning	30,5 cm
Tak til utluftåpning sentrum	30 cm
Sidevegg til 5 mm hull på gassrør	70 cm
5 mm hull til 4,5 mm hull	2 cm
4,5 mm til 4 mm	1,5 cm
4 mm til 3,5 mm	1,5 cm
3,5 mm til 3 mm	1,5 cm
3 mm til 2 mm	2,5 cm
5 mm til 1 mm	12,5 cm
Lekkasje hull til gulv	50 cm
Radiator til plastvegg	1 m
Sentralplan til sentrum utluftåpning	30 cm
Sentralplan til sentrum innluftåpning	40 cm
Sikkerhetsavstand trinsefører	4 m
Sikkerhetsavstand avleser	13 m

4.2. Antagelser og forutsetninger

4.2.1. Antagelser

- Temperaturen i konteineren trenger ikke være den samme som i et fyrrom, hvis man har en varmekilde som skaper et lignende varmeprofil som en brenner gjør
- Rommet ble ikke påvirket av andre ytre forhold enn ventilasjonsåpningene
- Varmetap til omgivelsene gjennom konteinerveggene kan neglisjeres
- Forflytning av metanmåler vil ikke skape turbulens i gassen av en slik grad at det påvirker målingene
- Metan er representativt for naturgass ved måling av konsentrasjon
- Forskjellen i værforholdene påvirket ikke resultatene

4.2.2. Forutsetninger

- Lekkasjeraten var konstant over tid
- Teknisk utstyr fungerte etter intensjon

4.3. Utførelse hovedforsøk

I forkant av forsøket i konteiner ble det utarbeidet Sikker Jobb Analyse for å holde høyt sikkerhetsnivå under forsøkene, se [vedlegg 7](#).

Gass ble sluppet inn i konteineren med 5 forskjellige rater, disse var: 22 l/min, 39 l/min, 62 l/min, 77 l/min og 93 l/min. Tau-/trinsesystemet ble styrt av person 1 plassert ved siden av konteineren, bak en sikkerhetsanretning. Samme person var ansvarlig for å notere metanmålerens horisontal posisjon og klokkeslett ved hver avlesing. Person 2 var ansvarlig for avlesing av gasskonsentrasjon og metanmålerens vertikale posisjon. Person 2 var plassert bak sikkerhetsanretning 13 meter fra plastvegg. Avlesning ble gjort ved hjelp av kikkert. Alle målinger ble synkronisert ved hjelp av to skjemaer der person 1 og 2 hadde hvert sitt som ble sammen koblet ved hjelp av numrene på avlesningene, se [vedlegg 8](#). Når person 1 hadde stilt inn metanmåleren i horisontal posisjon dirigerte person 2 den vertikale posisjonen slik at den ble nøyaktig for hver måling og for at for eksempel slakk i tauene ikke skulle påvirke resultatene. Grunnet lite display uten lys var det vanskelig å se tallene på metanmåleren. Selv med ekstra lyskilder som lyste inn i konteineren var det ikke mulig å lese av målinger helt bak i rommet. Se [vedlegg 6](#) for bilder og beskrivelse av utførelsen.

Hovedforsøket strakk seg over tre dager, men litt varierende værforhold. Se [vedlegg 9](#) for detaljert beskrivelse dag for dag.

4.4. Resultater

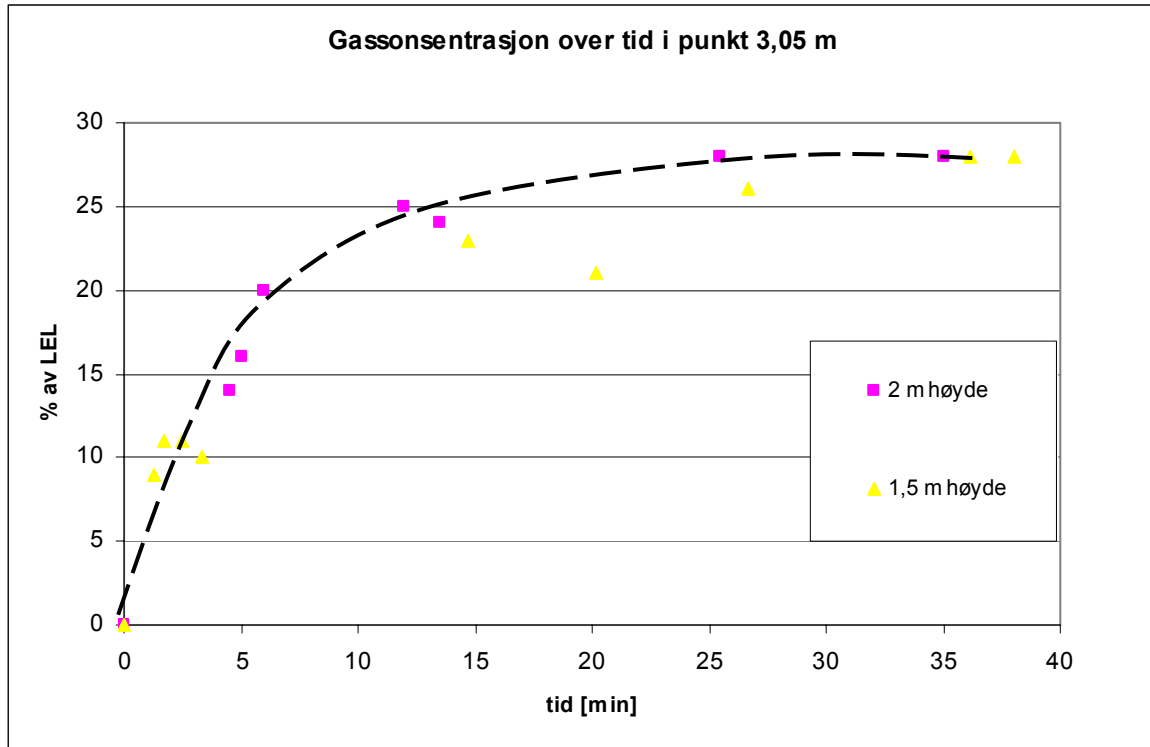
4.4.1. Likevekt og LEL

Likevekt av naturgasskonsentrasjon ble prøvd funnet ved å grafisk fremstille resultatene funnet i hovedforsøket. På et fast horisontalt punkt ble det sett på hvordan konsentrasjonen utvikler seg over tid ved forskjellige høyder. Når kurven begynner å flate ut antas det at likevekten nærmer seg eller har inntruffet. Ved de forskjellige lekkasjeratene ble høyeste målte verdi brukt for å se hvor nærme gasskonsentrasjonen var LEL.

I forsøkene ble det prioritert å få mange avlesinger i punkter over lekkasjen. Dette for å kunne finne tid til likevekt i dette området, for så å anta at likevekt inntreffer samtidig i hele konteineren. Området over lekkasjen ble valgt fordi det ligger om lag midt i konteineren, og det ble antatt at dette området hadde høyest gasskonsentrasjon. Tidsintervallene mellom hver avlesing i disse punktene varierer noe grunnet varierende antall avlesinger av andre punkter.

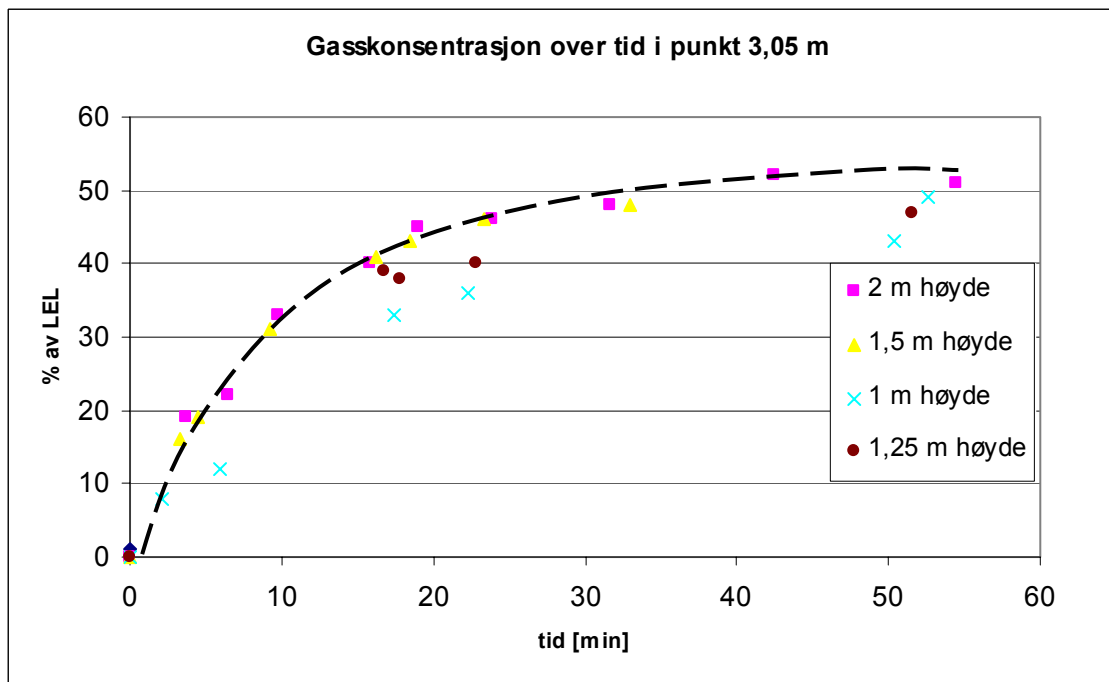
- Ved 2 mm hull som har en utslipprate på 22 l/min ser man at konsentrasjonen bygde seg opp over tid og etter cirka 30 minutter begynte kurven å flate ut, se graf 2. At kurvens stigning stagnerte kan tyde på at likevekten nærmer seg. Ved denne utslippsraten nærmet konsentrasjonen av gass seg 30 % av LEL, høyeste målte verdi var 28 %.

Graf 2: Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 22 l/min



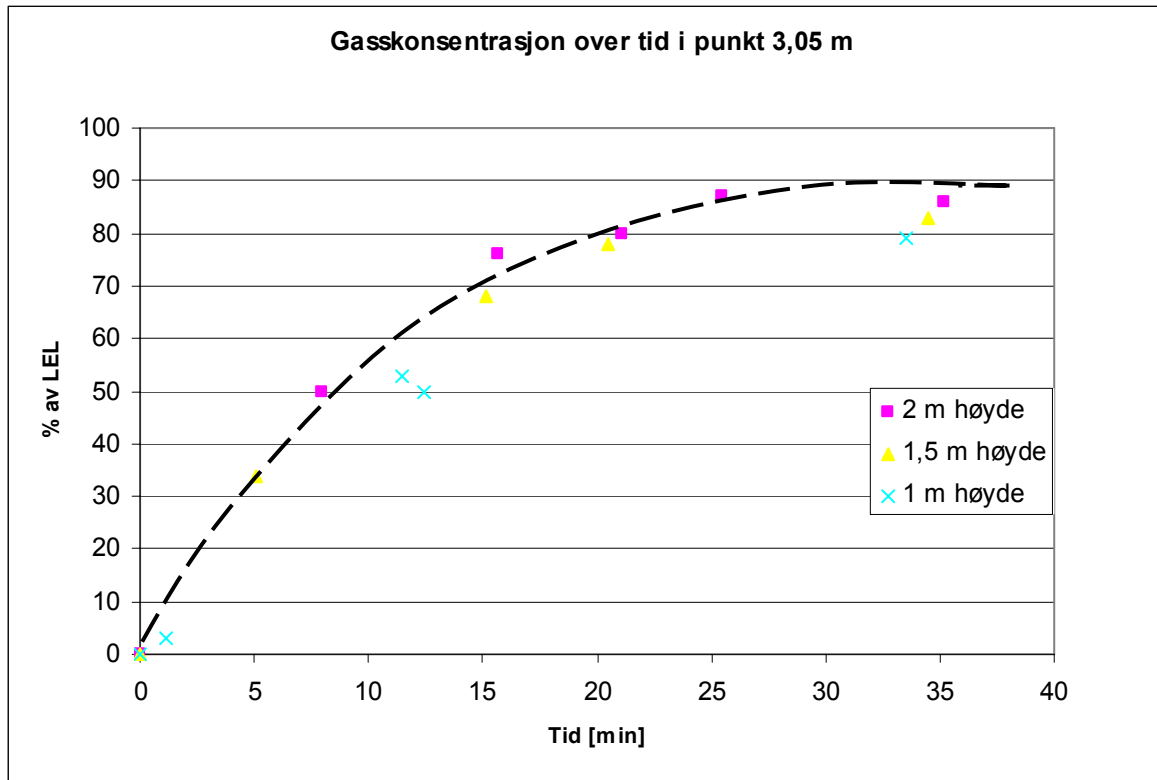
- Ved 3 mm hull som har en utslippsrate på 39 l/min begynte utflating av kurvene ved cirka 30 minutter, se graf 3. Ved denne utslippsraten passerte konsentrasjonen av gass 50 % av LEL, høyeste målte verdi ble 55 %.

Graf 3: Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 39 l/min



- Ved 4 mm hull som har en utslippsrate på 62 l/min begynte utflatning av kurven allerede ved 25 minutter og ved om lag 35 minutter hadde verdien på 2 meter sunket ned, se graf 4. Ved denne utslippsraten nærmet konsentrasjonen av gass seg 90 % av LEL, høyeste målte verdi var 87 %.

Graf 4: Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 62 l/min



- Ved 4,5 mm hull som har en utslippsrate på 77 l/min steg konsentrasjonen av gass til LEL i store deler av konteineren, og de tidligere målepunktene kunne ikke benyttes. På grunnlag av de tidligere forsøkene antas det at likevekten nærmet seg etter ca 30 minutter. Ved denne utslippsraten ble LEL registrert.
- Ved 5 mm hull som har en utslippsrate på 93 l/min steg konsentrasjonen av gass veldig fort, og tidlig i forsøket var det ikke mulig å registrere annet en LEL konsentrasjon helt ned til 1 meter, dette forsøket ble da avbrutt. Ved denne utslippsraten ble LEL registrert.

For samlet oversikt over alle lekkasjeratene brukt i hovedforsøket, se tabell 5

Tabell 5: Likevekt og høyest målt gasskonsentrasjon ved forskjellige lekkasjerater

Hulldiameter [mm]	Lekkasjeareal* [mm ²]	Strømning [l/min]	Høyest målt konsentrasjon [% av LEL]	Ca. tid til likevekt [min]
2	3,1	22	28	30
3	7,1	39	55	30
4	12,6	62	87	25
4,5	15,9	77	100	30
5	19,6	93	100	-

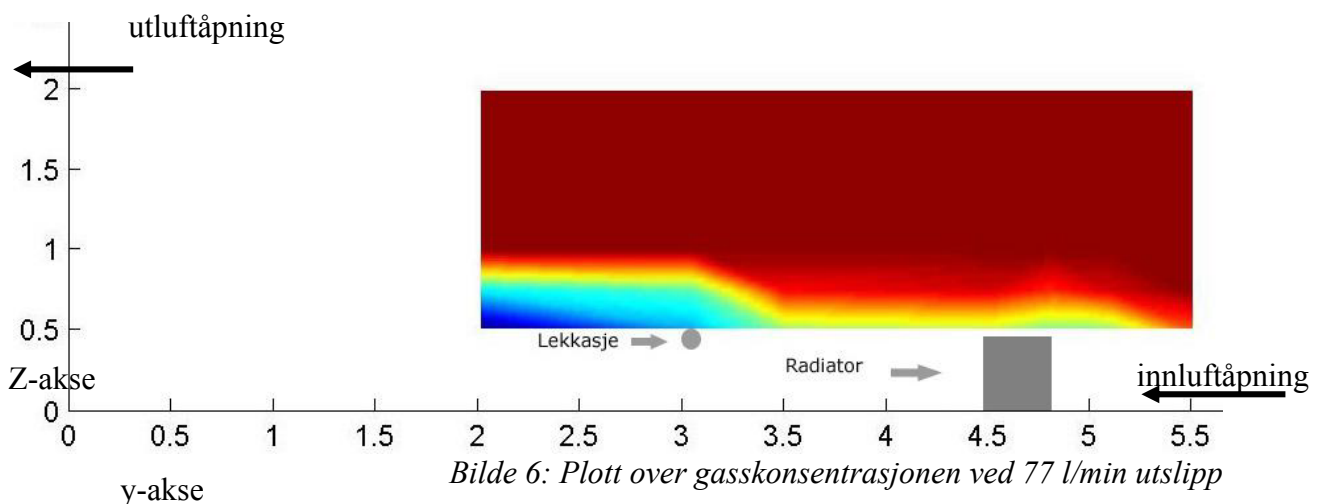
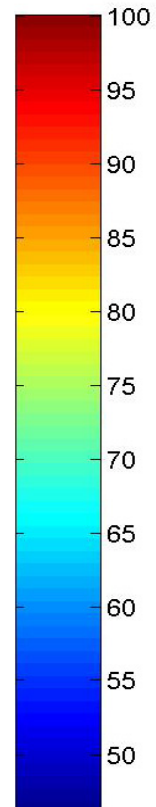
* finnes i [vedlegg 3](#)

4.4.2. Konsentrasjonskart

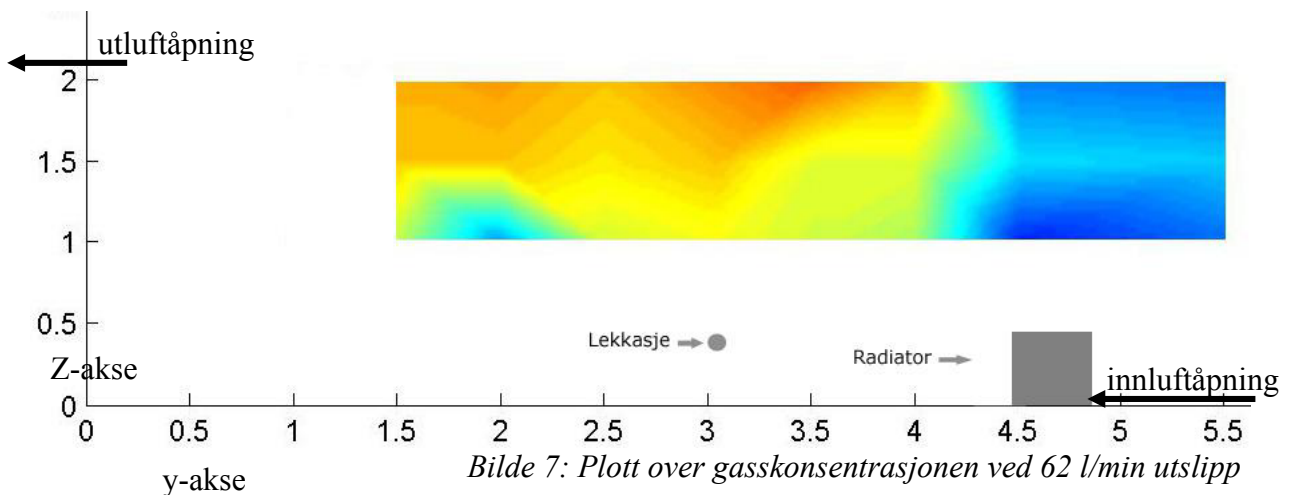
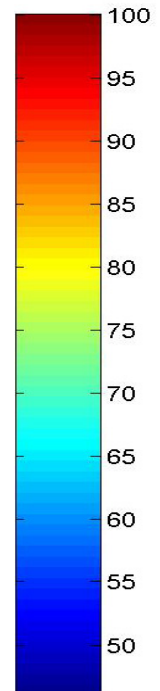
Konsentrasjonskartene er presentert ved hjelp av MATLAB.

Ved utslippsraten 77 l/min var mengden gass som ble sluppet inn i konteineren så stor at det dannet seg en et område med en konsentrasjon av gass som kom over LEL. Det ble kartlagt hvordan gassen la seg i de forskjellige delene av konteineren innen for området 2 til 5,5 meter fra trinsen i bakkant av konteineren. Kartlegging av konsentrasjonen i området 0 til 2 meter lot seg ikke gjøre på grunn av begrensninger satt av utstyret som var tilgjengelig og lysforholdene under forsøket. Bilde 6 viser en grafisk fremstilling av gasskonsentrasjonen i konteineren. De forskjellige fargene i fargeskalaen representerer ulike konsentrasjonsverdier. Det rødbrune området representerer den delen som har nådd LEL. Rød er mellom 90 % og 95 % av LEL, gul er cirka 80 % av LEL, grønn er 75 % av LEL, turkis er mellom 65 % og 70 % av LEL og mørkeblå er fra 45 % og opp til 65 % av LEL.

Ses det på området rundt 5,5 meter oppdages det at LEL sjiktet her oppnådde den laveste vertikale posisjonen i hele konteineren. Dette kan skyldes at oppdriften fra radiatoren og innluftåpning blandet luft inn i gassen, slik at gasskyen ekspanderte i dette området. Over radiatoren var det et lite område med lavere gasskonsentrasjon. Dette kan skyldes at radiatoren varmet opp den omkringliggende tynne gass-/luftblandingen nede ved gulvet, slik at den steg. I det området der selve lekkasjen var; på 3,05 meter var det ikke høyere konsentrasjon nede i sjiktene enn ellers i samme høyde. Konsentrasjonen her var faktisk lavere på 0,5 og 0,75 meters høyde enn den var mellom 3,5 og 5,5 meter. Området 2 meter til 3,5 meter viser at målingene nærmere utluftåpningen registrerte minkende konsentrasjonen i de lavere sjiktene mot åpningen. Verdiene i plottet er fra tidsrommet 34 minutter og til forsøket ble avsluttet etter 55 minutter. Ved denne utslippsraten dannet det seg et meget stort område der konsentrasjonen var over LEL.



Ved en utslippsrate på 62 l/min ble det ikke registrert data under en meters høyde grunnet mer interesse knyttet til hvordan gassen la seg høyere oppe der konsentrasjonen var tykkere og nærmere LEL. Noen av dataene brukt for å lage den grafiske fremstillingen er funnet ved beregning ut fra trender i horisontal retning og i forhold til andre lekkasjerater, se [vedlegg 10](#). Bilde 7 dekker ikke det samme området som bilde 6, men viser hvordan gassen la seg ved lavere konsentrasjon i det område av konteineren som var over 100 % av LEL ved lekkasje 77 l/min. Bilde 7 viser at ved innluftåpningen og i området rundt radiatorene var konsentrasjonen av gass lavere enn fra 3,5 meter og nærmere utluftåpningen. Kartleggingen kan tyde på at ved innluftåpningen var det mer sirkulasjon mellom luft og gass, mens gassen nærmere utluftåpning la seg lagvis nedover i konteineren. Varmestrømmene fra radiatorene skapte oppdrift og dannet et skille mellom den delen som luften kom inn og resten av konteineren, dette skapte en høyere konsentrasjon av gass i området mellom 1,5 meter og 4 meter i horisontalretning. Verdiene i plottet starter fra det 22 minutt og frem til forsøket ble avsluttet på grunn av teknisk svikt etter 36 minutt. Ved denne utslippsraten dannet det seg ikke et område som overskrider LEL og det ble ingen sky med eksplosjonsfarlig blanding.



4.5. Usikkerheter

Forhold som kan ha påvirket resultatet av forsøkene i konteineren:

- Skiftende værforhold og vindstyrke kunne påvirke ventilasjonsforholdene i konteineren
- Metanmåleren ble beveget gjennom gassen, dette kan ha skapt tettere gass konsentrasjon inne i måleren
- Gass konsentrasjonen inne i måleren kan ha vært høyere enn i området rundt når den ble beveget fra ett område med høygasskonsentrasjon til et område med lav gasskonsentrasjon
- De ulike lekkasjehullene hadde ulik avstand fra veggen, opp til 9 cm forskjell
- Konteineren var ikke hermetisk tett utenom ventilasjonsåpningene

5. ARBEIDSPROSESSEN

Oppgaven skulle i utgangspunktet løses ved hjelp av en eller flere modeller som ble skalert ned i størrelse. Her viste det seg at teorien ikke var lett å tilegne seg. Ingen som ble kontaktet var i stand til å redegjøre for hvordan noe slikt skulle utføres. Ved denne type skalering må det tas hensyn til innstrømningshastighet, diffusjonshastighet, luftutskifting, rørdiameter, trykk og varmestrøm. Alle disse parametrene gjør at en skalering har veldig mange usikkerhetsmomenter, som igjen kan føre til gale resultater. Det var heller ikke tilgjengelig bra nok utstyr til å gjennomføre målinger av gass i en nedskalert modell. Ved skalering er det nødvendig å lage flere størrelser på modellene for å sikre at resultatene stemmer overens med hverandre. I tillegg ville det vært hensiktsmessig å sammenligne slike resultater opp mot fullskala forsøk for å få bekreftet troverdigheten. Ved bruk av en slik metode ville mye av fokus blitt rettet mot hvordan skaleringen ble beregnet og diskusjon rundt troverdigheten i resultatene. I motsetning vil fullskala forsøk gi resultater som kan brukes direkte.

Et problem som viste seg å være en utfordring var hvordan metanmåleren kunne beveges inni konteineren på en effektiv måte, samtidig som et høyt sikkerhetsnivå skulle opprettholdes. Valget falt til slutt på et tausystem som kunne føre måleren i vertikal og en horisontal retning. Fordelene med dette systemet var at den som beveget måleren kunne stå i sikker posisjon dersom gassen skulle antennes. Tausystemet dekket det mest hensiktsmessige planet som kunne velges i to dimensjoner. Tausystemet innebar en ny utfordring angående avlesing av displayet på metanmåleren. Løsningen ble å bruke en kikkert kombinert med arbeidssol som lyser inn gjennom kortsiden dekket med gjennomsiktig plast. På denne måten kunne avleser også holde en trygg avstand bak en sikkerhetsanretning. Flytting og avlesing av måler i hovedforsøket var tidkrevende, og tok i snitt litt over ett minutt mellom hver avlesing. I forsøkene kartlas kun et avgrenset område langs et todimensjonalt plan. Dette området ble avgrenset på grunn av mangel på sikt for avlesing innerst i konteineren. Området ble ytterligere avgrenset for at det ikke skulle ta for lang tid mellom hver avlesing på hvert punkt. Det ble valgt et område i vertikal avstand fra 1 meter over gulvet og opp til taket ved små lekkasjerater, fordi naturgass er lettere enn luft, og dermed var det størst sannsynlighet for å finne den høyeste konsentrasjonen av gass oppe langs taket. Ved større lekkasjer ble avlesingen foretatt i vertikal høyde 0,5 meter og opp til der LEL allerede var inntruffet. Målinger over punkt som viste gasskonsentrasjon over LEL var ikke hensiktsmessig å måle, da disse områdene var eller hadde vært innenfor eksplosjonsområdet. Det ble valgt bort å se på gasskonsentrasjonen i tre dimensjoner, da dette ville blitt meget tidkrevende. Det var to måter dette kunne blitt løst på; den ene var å lage et tredimensjonalt trinsesystem, men da ville det tatt lang tid mellom hver gang en avlesing ble foretatt på samme punkt, samtidig som prosessen med å lage systemet ville blitt mye mer omfattende. Det andre alternativet var å gjennomføre forsøket tre ganger for hver lekkasjerate, og flytte trinsesystemet mellom hver gang. Da ville oppholdet på Bleivik bli tredoblet. Dersom metanlogger med mange loggepunkter ble brukt, kunne en lagd et tredimensjonalt kart over gasskonsentrasjon over tid. Metanlogger var ikke tilgjengelig under forsøkene.

6. DISKUSJON

Det antas at kartlagt område var representativt for resten av konteineren, slik at det ikke fantes områder med vesentlig høyere konsentrasjon enn der det ble kartlagt. Det kartlagte området dekket de faktorer som skapte usikkerhet angående gassens fordeling i konteineren. Fordeling av gass i x-retning (på tvers av konteineren), antas å ikke avvike betydelig fra det kartlagte planet.

Under forsøkene ble det erfart at rørkoblinger ikke lett lar seg åpne dersom gjengene er belagt med gjengeteip eller filt. Vibrasjoner eller dårlig utført arbeid ved installasjon eller vedlikehold kan føre til at koblingen ikke er helt festet. Er koblingen skrudd hele to omdreining av, vil lekkasjeraten være cirka 20 l/min. Dette tilsvarer lekkasje gjennom et sirkulært hull med to mm diameter. Ved en slik lekkasje i fyrrom vil gasskonsentrasjonen komme opp imot 30 % av nedre eksplosjonsgrense. En gjengekobling i forsøkene kunne skrus 5 omdreining på røret. Lekkasje gjennom sirkulære hull med diameter tre mm slipper igjennom cirka 40 l/min, noe som tilsvarer en gjengekobling som kun har en halv omdreining fra å falle helt av. En slik løs gjengekobling anses som svært urealistisk. Høyeste måling med denne lekkasjen i konteineren var 55 % av LEL.

Området fra radiatoren og mot utluftåpning hadde en lagvis vertikal fordeling av naturgass, med høyest konsentrasjon i det øverste sjiktet. Ved radiatoren var det en vertikal front mellom høy og lav gasskonsentrasjon. Området mellom innluftåpning og radiator hadde lavere gasskonsentrasjon, men jevnere fordeling i vertikal avstand. Dette kan skyldes radiatorens omkringliggende naturgass-/luftblanding blir varmet opp og stiger mot taket. Naturgass-/luftblandingen som lå i en halv meters høyde hadde en lavere gasskonsentrasjon enn i høyere sjikt. Dette kunne føre til at de øvre sjiktene ble tynnet ut i området over radiatoren. Grunnen til at det ble dannet et vertikalt skille mellom høy og lav gasskonsentrasjon over radiatoren kan skyldes at den ene siden fikk gasstilførsel fra lekkasjen, samtidig som den andre siden fikk frisklufttilførsel fra innluftåpning. Det ble ikke kartlagt spesielt høy gasskonsentrasjon like ved lekkasjen. Dette viser at naturgass er veldig flyktig.

Forsøkene med forskjellig utslippsrate ble ikke målt over samme tidsperspektiv. Dette skyldes ulike faktorer som utstyrsvekt ved 77 l/min utslippsrate, tom for gass og metanmålerbatteri ved 62 l/min utslippsrate, og utslipp på 93 l/min ble avbrutt grunnet flasken ikke inneholdt nok gass til å nå likevekt i konteineren. Dette kan være et tynt grunnlag å basere påstand om at likevekt er inntruffet. Tendensen i målinger i faste punkt over tid tyder likevel på at likevekt er tilnærmet inntruffet.

Det er gjort sammenligninger av de målte lekkasjeratene funnet i delforsøket med beregninger med Bernoulli's ligning [7] og formel for volumstrøm ($Q=V \times A$, der V er hastighet og A er areal på hullet). Målingene avviker mye fra beregnede lekkasjerater. Tabell 6 viser en sammenligning av målte og beregnede verdier.

Tabell 6: Sammenligning mellom målte og beregnede lekkasjerater

Diameter på lekkasjehull [mm]	Målte verdier i forsøk [l/min]	Beregning ved Bernoulli's ligning [l/min]
1	10	7
1,5	16	17
2	22	30
2,5	31	47
3	40	67
3,5	56	91
4	62	119
4,5	77	151
5	93	186

Sammenlignes de geometriske tilnærmingene med hverandre, følger de målte verdiene formelen $y=9,1899x^{1,394}$, se [vedlegg 3](#), og beregningene følger formelen $y=7,4472x^2$, se [vedlegg 11](#). I formlene er y strømming i liter per minuttet, og x er diameter på sirkulært lekkasjehull. Grunnen til avvik mellom disse metodene kan skyldes flere faktorer; Bernoulli's ligning er en ideell ligning som gir gode resultater på inkompressible fluider der friksjonen er veldig lav. Ved bruk av formelen antas det at hastigheten inne i røret er lik null og har konstant trykk lik 0,1 bar. Ved små lekkasjehull vil strømmingen i røret være veldig liten og trykket tilnærmet konstant, ved økende areal på lekkasjehull vil hastighet og trykk i røret fravike mer fra formelen. Naturgass er ikke et inkompressibelt fluid og dette kan være grunnen til forskjellen. Det velges likevel å sammenligne med Bernoulli's likning da gassen antas å fungere tilnærmet et inkompressibelt fluid i røret. Et annet forhold som kan være med å påvirke differansen er at ved beregning antas gassen å være 15 °C og ha tetthet 0,8 kg/m³. Under forsøkene kom gassen fra en trykkflaske, der temperaturen var svært lav, gjennom en kort distanse med slange og rør. Dette kan gjøre at gassen ikke hadde samme temperatur og tetthet som i beregningene.

En antagelse som ble gjort ved to tilfeller under forsøkene var at metan ble regnet som representativt for naturgass. Dette ble gjort ved bruk av metan måler for å finne konsentrasjonene av naturgass, og for å utføre omregninger fra luftstrøm til gasstrøm i rotameteret. Tettheten til metan er 0,668 kg/m³ [7] sammenlignet med naturgassens 0,8 kg/m³. Dette kan gi utslag i at omregnede lekkasjerater er litt høyere enn de faktiske størrelsene. I rapporten vil det kun føre til usikkerhet i mellomleddet som forteller hvor mye gass som kommer ut av en gitt lekkasje. I konklusjonen velges det å fokusere mest på hvor stort lekkasjeareal må være, og ikke strømming, da denne medfører en liten usikkerhet ved omregning.

Det er knyttet en viss usikkerhet til hvordan omplassering av de forskjellige elementene ville påvirket resultatene. Forsøkene har vist at det ble tynnere gasskonsentrasjon oppe ved taket over varmekilden. Ville det ved plassering av varmekilde sammen med utluftåpning blitt ventilert ut en relativt tynn gasskonsentrasjon i forhold til resten av konteineren, slik at gasskonsentrasjonen bygger seg opp raskere og høyere? Da trengs det mindre lekkasjeareal for å nå eksplosjonsfarlige forhold inne i konteineren. Dette er en faktor det burde blitt sett nærmere på ved eventuelt oppfølgende arbeid.

7. KONKLUSJON

Med de forutsetninger og antagelser som lå til grunn i forsøkene er det liten sannsynlighet for at et fyrrom ved normal drift og vedlikehold vil få naturgasskonsentrasjon over nedre eksplosjonsgrense. Lekkasje i leveringsnett av naturgass kan kun skape eksplosiv atmosfære i fyrrom dersom lekkasjearealet er over $12,6 \text{ mm}^2$, som tilsvarer lekkasje gjennom et sirkulært hull med diameter 4 mm. Omregning av forsøksresultatene gir en lekkasjerate på 62 l/min ved dette arealet. Gjennom forsøk er det vist at dette tilsvarer en gjengekobling som har kun mellom en halv til en kvart omdreining fra å være helt av.

På grunn av tettheten til naturgass vil den stige opp til taket og ventileres ut gjennom utluftåpning. Varmekilden skaper sirkulasjoner som blander luft og gass bedre. Dette gir utslag i at over varmekilden vil gass-/luftblandinga bli tynnere, se konsentrasjonskart for lekkasjerate 62 l/min. Ved større lekkasjer vil omfanget av eksplosjonsfarlig sky bli større, se konsentrasjonskart for lekkasjerate 77 l/min.

Maksimal utslippsrate av gass ved størst mulig lekkasje, tilsvarende helt avbrudd rør, var ikke målbart med det utstyr som var tilgjengelig i forsøkene.

8. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Ved bruk av metanloggesystem med mange loggepunkter vil en kunne kartlegge gasskonsentrasjonen over tid i hvert punkt, og en kan kartlegge området som ikke var mulig med tilgjengelig utstyr brukt i dette forsøket. Konsentrasjonskart over gassen i konteineren vil bli mer komplett og tid til likevekt kan dokumenteres i alle punkter.

Noe som kan være interessant å se på videre, er hvordan naturgassen vil legge seg avhengig av hvor varmekilden og lekkasjen er plassert. Lignende forsøk med fullt avbrekk ved standard trykk, eller lekkasje samtidig som regulator svikter og gir høyere trykk inn i gassrøret, kan være problemstillinger å ta tak i.

OVERSIKT TABELLER, GRAFER OG BILDER

Tabell 1: <i>Fakta om naturgass</i>	side: 6
Tabell 2: <i>Lekkasjerate i løs gjengekobling</i>	side: 11
Tabell 3: <i>Lekkasjerate gjennom sirkulære hull</i>	side: 11
Tabell 4: <i>Størrelser og avstander</i>	side: 15
Tabell 5: <i>Likevekt og høyest målt gasskonsentrasjon ved forskjellige lekkasjerater</i>	side: 19
Tabell 6: <i>Sammenligning mellom målte og beregnede lekkasjerater</i>	side: 24
Graf 1: <i>Grafisk fremstilling av mengden gass gjennom hull med ulik diameter</i>	side: 12
Graf 2: <i>Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 22 l/min</i>	side: 17
Graf 3: <i>Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 39 l/min</i>	side: 17
Graf 4: <i>Gasskonsentrasjon over tid ved 3,05 m, utslipp 62 l/min</i>	side: 18
Bilde 1: <i>Skisse over oppsett i delforsøk</i>	side: 9
Bilde 2: <i>Viser oppsettet under delforsøket. På bildet viser ikke rustfritt rør som var koblet til regulatoren</i>	side: 10
Bilde 3: <i>33,7 mm rustfritt rør med hull</i>	side: 10
Bilde 4: <i>Konteiner sett ovenfra</i>	side: 13
Bilde 5: <i>Konteiner sett fra siden</i>	side: 14
Bilde 6: <i>Plott over gasskonsentrasjonen ved 77 l/min utslipp</i>	side: 20
Bilde 7: <i>Plott over gasskonsentrasjonen ved 62 l/min utslipp</i>	side: 21

REFERANSER

- [1] Gasnor ASAs hjemmeside (www.gasnor.no)
- [2] Strand M. Ulykken som skader Putin, Dagbladet 22.8.2002. (<http://www.dagbladet.no>)
- [3] NTNUs hjemmeside (www.ntnu.no), *Ulykker i kjemisk og petrokjemisk industri* (15.1.2002)
- [4] Gasnor ASA *NATURGASS brosjyre* (Gasnor 2002)
- [5] DBE's hjemme side (www.dbe.no). *DBE's oppslagsverk "Føre var..." Forskrift om behandling av brannfarlig vare*, (DBE, 26. juni 2002)
- [6] DBE's hjemme side (www.dbe.no). *DBE's oppslagsverk "Føre var..." Veiledning om fyringsanlegg for flytende og gassformig brensel*, (DBE, november 1998)
- [7] Franzini J.B. & Finnemore E.J. *Fluid Mechanics with engineering applications*, 9th edition (WCB/McGraw-Hill, 1997)

VEDLEGG

1. Prøvetaking og analyse dokument av naturgass
2. Gassinstallasjon ved mindre og mellomstore bedrifter, skisse
3. Resultatskjema delforsøket
4. Veiledning for beregning av ventilasjonsforhold, fra Ferkingstad og Alsaker VVS
5. Beregning av ventilasjonsforhold
6. Detaljert beskrivelse og bilder fra hovedforsøket
7. Sikker Jobb Analyse for fullskala forsøk av fyrrom ved ResQ
8. Avlesningsskjema under hovedforsøk
9. Værforhold under hovedforsøk
10. Resultatskjema hovedforsøket
11. Beregninger med Bernoulli's likning
12. Omregningstabell, luft til metan

Vedlegg 1: Prøvetaking og analyse dokument av naturgass

Månedlig Analyse januar 2003

Vedlagt følger månedlig analyse for tørrgass levert fra Draupner til Kårstø for januar 2003 for bruk i GASNOR's målesystem.

Fra sist årsskifte er regimet for gasstransport endret og det betyr i denne sammenheng at ISO 6976 1995 benyttes for beregninger. I beregningene regnes alt fra hexane og tyngre som normalhexan. Dette er det tatt hensyn til i beregningene av standardtetthet, GCV og NCV.

Standard tetthet:	0,801247 Kg/Sm ³
Brennverdi(GCV):	41,46619 MJ/Sm ³
Brennverdi(NCV):	37,51963 MJ/Sm ³

PRØVETAKING OG ANALYSE DOKUMENT

PRØVETAKING

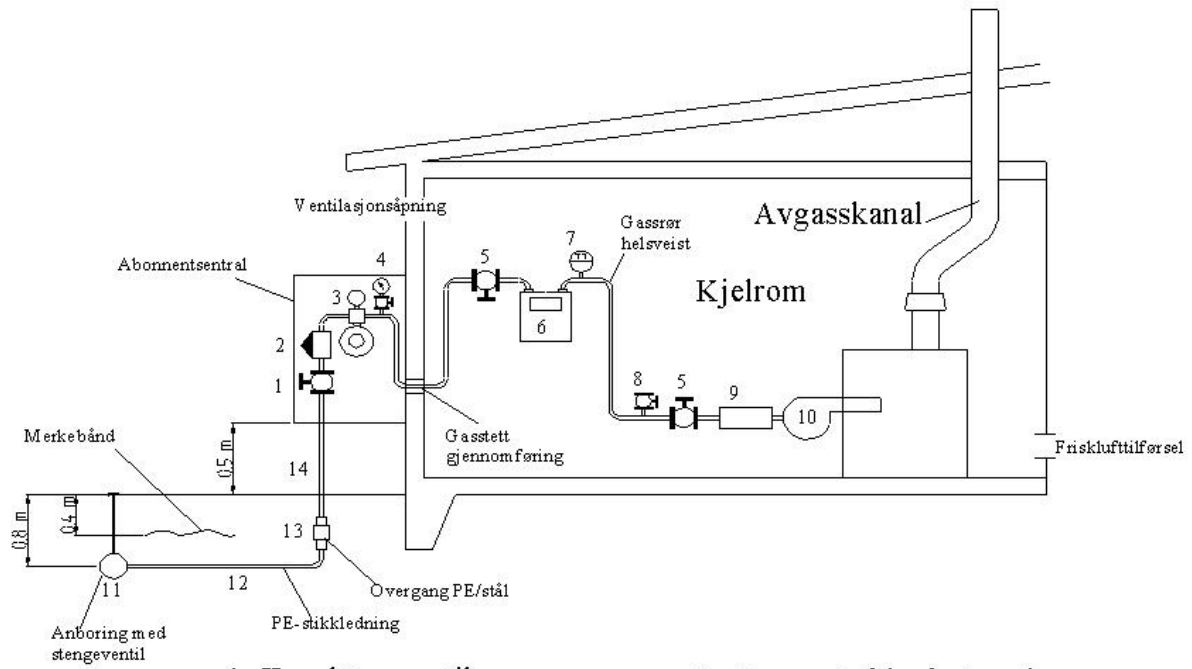
PRØVETAKING STED: <i>KÅRSTØ</i>	PRØVEPUNKT: <i>AUTOSAMPLER, 23-AX-0004</i>
START FOR PRØVETAKING, DATO/KL. <i>01.01.03 12:00</i>	SLUTT PÅ PRØVETAKING, DATO/KL. <i>01.02.03 13:00</i>
SYLINDER BETINGELSER VED SLUTT PÅ PRØVETAKING <i>140 BAR 3 DEG C</i>	"BACKUP" SYLINDER SERIE NR: <i>17331</i>
SYLINDER SERIE NR: <i>17331</i>	PRØVE MOTTATT, DATO -----
FARGE KODE <i>BRUN</i>	PRØVEN ANALYSERT DATO <i>17.02.03</i>
WEST LAB REF: <i>2003-0683</i>	KOMMENTARER:

ANALYSER

Komponent	Unnormalisert Mol%	Normalisert Mol%
Oksygen/Argon	-----	-----
Nitrogen	<i>0,891</i>	<i>0,892</i>
Karboondioksid	<i>1,588</i>	<i>1,590</i>
Metan	<i>85,729</i>	<i>85,820</i>
Etan	<i>7,933</i>	<i>7,941</i>
Propan	<i>2,977</i>	<i>2,981</i>
Iso-butan	<i>0,264</i>	<i>0,265</i>
Normal-butan	<i>0,386</i>	<i>0,387</i>
Iso-pentan	<i>0,049</i>	<i>0,049</i>
Normal-pentan	<i>0,042</i>	<i>0,042</i>
Heksan	<i>0,015</i>	<i>0,015</i>
Heptan plus	<i>0,018</i>	<i>0,018</i>
TOTAL	<i>99,892</i>	<i>100,000</i>

Er det spørsmål kan Odd Inge Sandvik, Kårstø kontaktes. Tlf: 62 77 25 73, Email: odis@statoil.com

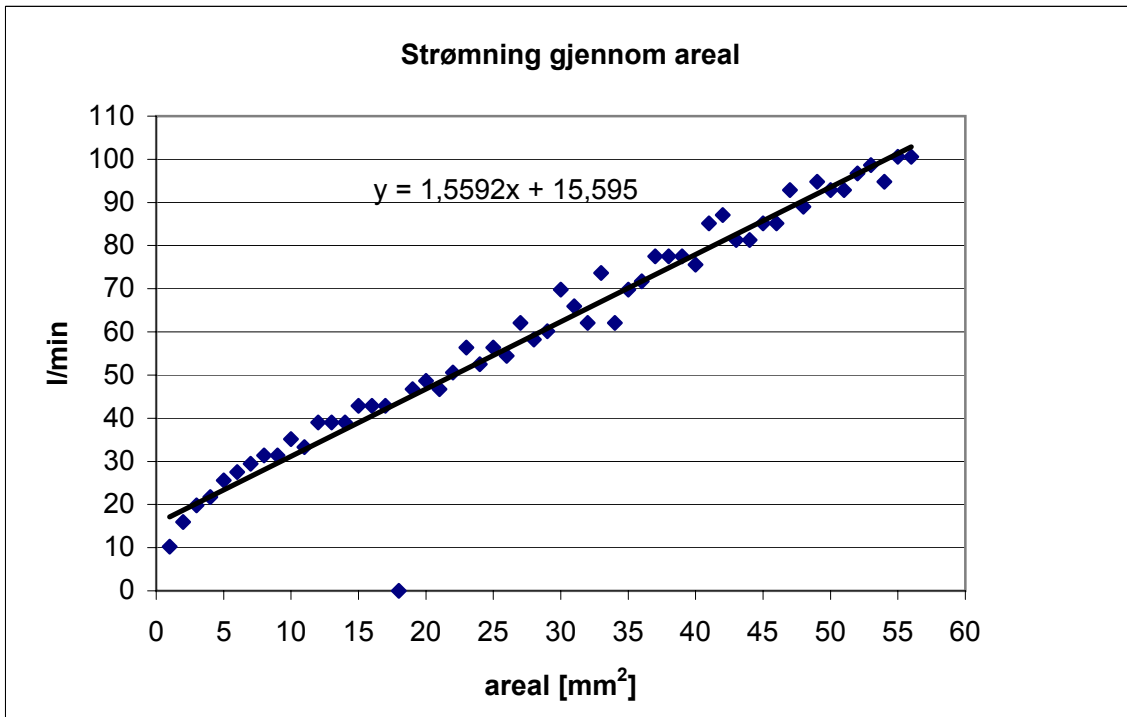
Vedlegg 2: Gassinstallasjon ved mindre og mellomstore bedrifter



- | | |
|---|----------------------------------|
| 1. Hovedstengeventil | 7. Temperaturføler for temp.komp |
| 2. Filter | 8. Avluftningsventil |
| 3. Gassregulator m/
hurtigstengeventil og
avblåsningsventil | 9. Gassarmaturgruppe |
| 4. Avluftningsventil m/manometer | 10. Brenner |
| 5. Avstengningsventil | 11. Anboring m/stengeventil |
| 6. Gassmåler | 12. PE-stikkledning |
| | 13. Overgang PE/stål-kopper |
| | 14. Gassledning helsveist |

Strømning gjennom arealer
Vedlegg 3

diameter	areal
1,0	0,785
1,5	1,766
2,0	3,140
2,5	4,906
3,0	7,065
3,5	9,616
4,0	12,560
4,5	15,896
5,0	19,625



areal [mm ²]	strømning [l/min]	kombinasjon
0,785	10,2	1
1,76625	15,97	1,5
2,55125	19,81	1,5+1
3,14	21,73	2
3,5325	25,58	1,5+1,5
3,925	27,5	2+1
4,3175	29,42	1,5+1,5+1
4,90625	31,34	2+1,5
4,90625	31,34	2,5
5,69125	35,19	2+1,5+1
5,69125	33,27	2,5+1
6,6725	39,03	2+1,5+1,5
6,6725	39,03	2,5+1,5
7,065	39,03	3
7,4575	42,88	2+1,5+1,5+1
7,4575	42,88	2,5+1,5+1
8,04625	42,88	2,5+2

areal [mm ²]	strømning [l/min]	kombinasjon
8,43875	46,72	2,5+1,5+1,5
8,83125	48,65	2,5+2+1
8,83125	46,72	3+1,5
9,22375	50,57	2,5+1,5+1,5+1
9,61625	56,34	3,5
9,8125	52,49	2,5+2+1,5
10,5975	56,34	2,5+2+1,5+1
10,99	54,41	3+2+1
11,57875	62,1	2,5+1,5+1,5+2
11,97125	58,26	3+2+1,5
11,97125	60,18	3+2,5
12,1675	69,79	3,5+1,5+1
12,36375	65,95	2,5+2+1,5+1,5+1
12,56	62,1	4
13,14875	73,64	3,5+1,5+1,5
13,345	62,1	4+1
14,5225	69,79	3+2+1,5+1,5+1
15,11125	71,71	3+2,5+2
15,50375	77,48	3+2,5+1,5+1,5
15,7	77,48	4+2
15,89625	77,48	4,5
15,89625	75,56	3+2,5+2+1
16,28875	85,17	3,5+2,5+1,5
16,28875	87,09	3,5+2+1,5+1,5
16,8775	81,33	3+2,5+2+1,5
16,8775	81,33	4+1,5+1,5+1
17,46625	85,17	4+2+1,5
17,6625	85,17	3+2,5+2+1,5+1
18,055	92,86	3,5+2,5+1,5+1,5
18,64375	89,01	3+2,5+2+1,5+1,5
19,42875	94,78	3+2,5+2+1,5+1,5+1
19,42875	92,86	4,5+1,5+1,5
19,625	92,86	5
20,0175	96,70	4+2+1,5+1,5+1
20,21375	98,63	4,5+1,5+1,5+1
20,41	94,78	5+1
20,60625	100,55	4+2,5+2
21,39125	100,55	5+1,5
23,1575	over 100,55	5+1,5+1,5
23,35375	over 100,55	3,5+3+2,5+1,5

Vedlegg 4: Veiledning for beregning av ventilasjonsforhold, fra Ferkingstad og Alsaker VVS

Fyrrom skal være tilstrekkelig ventilert for å sikre:

- Tilstrekkelig lufttilførsel til forbrenning
- Utlufting av evt. diffuse lekkasjer

Naturlig ventilasjon skal fortrinnsvis utføres slik at en oppnår en diagonal luftsirkulasjon i fyrrommet med innluft nede langs gulvet på den ene siden av kjele/brenner og utluft høyt oppe på veggen på andre siden av rommet. Ventilasjonsåpningene skal ikke være avstengningsbar.

Åpning for tilførsel av forbrenningsluft

Åpning (lysåpning) for tilførsel av forbrenningsluft skal være $6,0 \text{ cm}^2/\text{kW}$ merke effekt på brenneren dersom brenneren ikke er utstyrt med forbrenningsluft vifte. Er brenneren utstyrt med forbrenningsluft vifte skal lysåpningen være $1,5 \text{ cm}^2/\text{kW}$ merke effekt.

Åpning for tilførsel av ventilasjonsluft

Åpning (lysåpning) for tilførsel av ventilasjonsluft skal være $3,5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ gulvareal, dog minimum 50 cm^2 . En og samme åpning kan benyttes for tilførsel av både forbrenningsluft og ventilasjonsluft dersom en følger det kravet som gir størst areal på åpningen.

Åpning for ventilasjonsluft ut

Åpning (lysåpning) for ventilasjonsluft ut skal være $3,5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ gulvareal, dog minimum 50 cm^2 . Som åpning for ventilasjonsluft ut godtas avgass- eller røkgass kanal om denne har tilstrekkelig areal. Slik kanal skal ikke være avstengbar. Det bør allikevel om mulig finnes en ventilasjonsåpning på et høydepunkt i rommet.

Mekanisk ventilasjon

Benyttes mekanisk ventilasjon av fyrrom, skal denne sikre lufttilførsel til rommet som vist nedenfor:

Installasjon uten forbrenningsluft vifte 3 m^3 luft per time kW merke effekt
Installasjon med forbrenningsluft vifte $1,5 \text{ m}^3$ luft per time kW merke effekt

Mhp ventilasjonsluft så skal luftomsetningen i rom med eksempelvis måler og regulator være $0,35 \text{ l/s}$ per m^2 gulv areal, dog min $2,0 \text{ l/s}$.

Vedlegg 5: Beregning av ventilasjonsforhold

Gulvareal: 14,4 m²

Effekt ovn: 500 kW

Krav til størrelse på ventilasjonluft ut: 3,5 cm²/m² gulvareal [\[vedlegg 4\]](#)

Krav til størrelse på ventilasjonluft inn: 3,5 cm²/m² gulvareal [\[vedlegg 4\]](#)

Nødvendig åpning for tilførsel av forbrenningsluft:

750 cm² er kapasiteten ventilasjonsåpningene må ha til sammen, [5] og [6]

Åpning for ventilasjonluft ut:

50,4 cm²

Åpning for tilførsel av ventilasjonluft:

699,6 cm²

Vedlegg 6: Detaljert beskrivelse av hovedforsøket

	<p>Konteineren stod plassert på øvre brannfelt på ResQ Haugesund.</p>
	<p>Gassflaska var plassert bak sikkerhetsnett omtrent midt på den ene langsida. Skulle gassen inni konteineren antennes ville gassflasken i liten grad blitt berørt av trykkbølgene. Regulatoren (innringet) gav konstant fire bars trykk videre til gasslangen.</p>



Regulator 2 gjorde fire bar om til 0,1 bar trykk videre til gassrøret. En avstengingsventil (innringet) gjorde at gasslekkasjen lett kunne stenges av.



Inni konteineren stakk gassrøret ca en meter inn fra langsida, og i en høyde 50 cm over gulvet. De lekkasjehullene som ikke var i bruk, ble teipet igjen.



Tau-/trinsesystemet bestod av to separate tau. Det ene var koblet sammen i endene og bestemte horisontal posisjon til metanmåleren. Tauet gikk fra trinse innerst i konteineren til tau-/trinsefører i ring.



Metanmåleren ble styrt vertikalt ved hjelp av det andre tauet. Et lodd var festet under måleren for å gi større tyngde ved nedsenking.



Ved plastveggen gikk tauene gjennom et lite hull, for så å bli dreid 90 grader gjennom en ny trinse.



På utsiden rundet tauene hjørnet gjennom metallringer til tau-/trinsefører.



Tau-/trinsefører stod bak sikkerhetsanretning 4 meter fra langsida på konteineren.



Personen som leste av gasskonsentrasjon og høyde var plassert bak sikkerhetsanretning, 13 m fra plastveggen.



Avlesing skjedde ved hjelp av kikkert. På konteineren ble det markert et koordinatsystem for avlesing av høyder.



Innluftåpning ble skåret ut kvadratisk med areal 700 cm^2 . Platen ble forsterket med teip for å holde sin opprinnelige form.



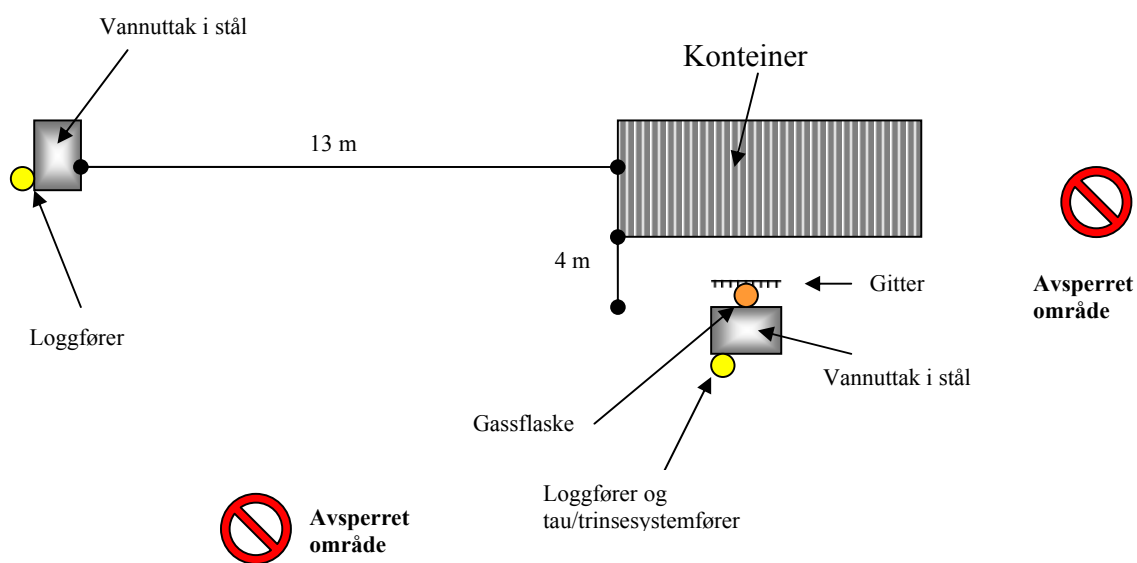
Skjærebrenner ble brukt for å lage utluftåpning. På grunn av praktiske hensyn måtte utluftåpningen bli plassert 30 cm fra sentralplanet. Arealet på åpningen er 51 cm^2 .

Vedlegg 7: Sikker Jobb Analyse

Kort beskrivelse av forsøk:	<p>Forsøk med lekkasje av naturgass skal utføres i en konteiner. Det skal simuleres en dårlig kobling mellom to gassrør, og testes hvor gasslekkasjeraten må være for å skape eksplosjonsfarlige forhold i konteineren. Tid til likevekt skal prøve finnes og dette skal sammenliknes med LEL. I tillegg skal et konsentrasjonskart lages.</p> <p>Det slippes gass inn i konteineren gjennom standard rør ved standard trykk. Helt oppe på kortsida er det en åpning for ventilasjonsluft ut, nede på motsatt vegg er det ventilasjonsåpning for innluft. En oljefylt radiator vil bli plassert 4 meter fra veggen med utluftsåpning som simulering av en brenners overskuddsvarme. Det skal da ved en hånd holdt måler måles gasskonsentrasjon i luften.</p> <p><i>Det er sammenheng mellom punktene FI. KI. og TI. Samme gjelder de resterende punktene</i></p>
Faremomenter:	<p>FI. Oljefylt radiator kan ved for stor varme koble inn sikkerhetstermostat, som kan skape gnist. Gnist kan antenne gassen dersom gass/luftblandingen er innenfor eksplosjonsområdet.</p> <p>FII. Oljefylt radiator blir så varm at den antenner gassen ved 540 °C.</p> <p>FIII. En tennkilde blir ført inn i eksplosjonsfarlig naturgass/luft blanding. Denne kan antenne gass/luftblandingen.</p> <p>FIV. Konteiner tåler ikke en eventuell gasseksplosjon</p>
Konsekvens:	<p>KI. Utstyr ødelegges, personer skades</p> <p>KII. Kan føre til KI</p> <p>KIII. Kan føre til KI</p> <p>KIV. Eksplosjonen vil utarte seg annerledes enn forventet</p>

<p>Tiltak:</p>	<p>TI. Slår av oljefylt radiator manuelt fra utsiden ved faste tidsintervall slik at den ikke oppnår høy temperatur. 10 min på, 2 min av.</p> <p>TII. Bruk av olje ovn som ikke får så høy egentemperatur i tillegg følges prosedyren i punkt I.</p> <p>TIII. All form for røyking, lighterer og annet som kan skape flammer eller gnister er forbudt rundt konteineren når forsøkene pågår.</p> <p>TIV. Dør på kortsida skal ikke låses fast, person som styrer tau/trinsesystemet oppholder seg bak massivt stålkonstruksjon.</p> <p>Området rundt konteiner må sikres og merkes, personer som gjør forsøkene må til enhver tid oppholde seg i sikker sone.</p>
-----------------------	---

Oversiktskisse av



Vedlegg 8: Avlesningsskjema under hovedforsøk

Tabell brukt av avleser

F. nr	% av LEL	Posisjon Vertikal
1		
2		
3		
4		
5		
6		
....		

Tabell brukt av tau-/trinsefører

F. nr	Tid	Posisjon Horisontal
1		
2		
3		
4		
5		
6		
....		

Vedlegg 9: Værforhold under hovedforsøk

04.04.03: Skulle teste utslipp av gass inn i konteineren.

Kl: 11:30 *Ute temperatur: 7 °C* *Vindstyrke: Mellom 1 m/s og 10 m/s.*

Kl: 12:30 *Ute temperatur: 7 °C* *Vindstyrke: Mellom 7 m/s og 15 m/s. Tester avbrutt; plastvegg trekkes ut på grunn av undertrykk langs veggen.*

07.04.03: Testet utslipp gjennom 5mm, 2mm og 3mm hull konteiner

Kl: 11:00 *Ute temperatur: 6 °C* *Inne temperatur: 8 °C*

Temperatur over ovner: 17 °C *Vindstyrke: 5 m/s*

Kl: 14:00 *Ute temperatur: 6 °C* *Inne temperatur: 10 °C*

Temperatur over ovner: 19 °C *Vindstyrke: 6 m/s*

08.04.03: Testet utslipp gjennom 4 mm hull i konteiner

Kl: 13:00 *Ute temperatur: 7 °C* *Inne temperatur: 9 °C*

Temperatur over ovner: 18 °C *Vindstyrke: 5 m/s*

09.04.03: Testet utslipp gjennom 4,5 mm hull i konteiner

Kl: 10:00 *Ute temperatur: 8,5 °C* *Inne temperatur: 10,5 °C*

Temperatur over ovner: 19 °C *Vindstyrke: 0,5 m/s*

Fredag 04.04.03 var det 86,9 % rh luftfuktighet mens onsdag 09.04.03 var den sunket til 44,3 % rh. Dette sammen med temperatur og vindstyrke illustrerer forholdsendringene på teststedet.

Vedlegg 10: Resultatskjema hovedforsøk

Totalt 12 sider

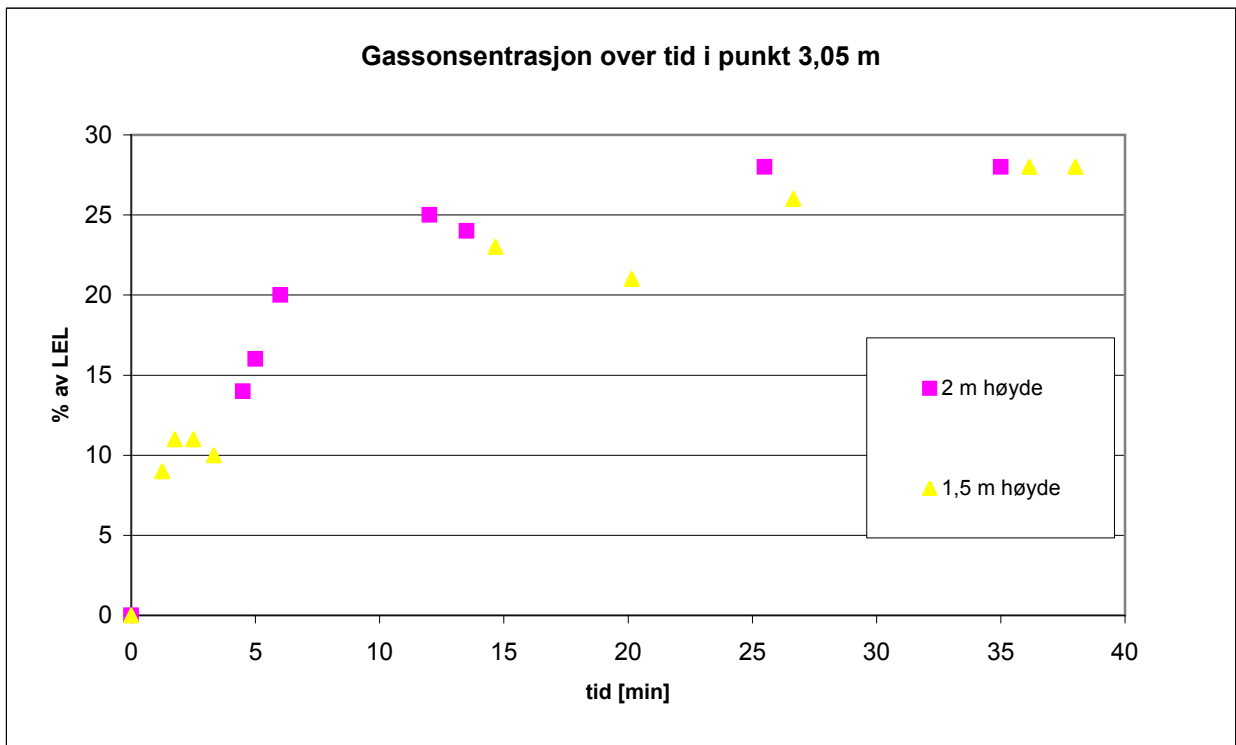
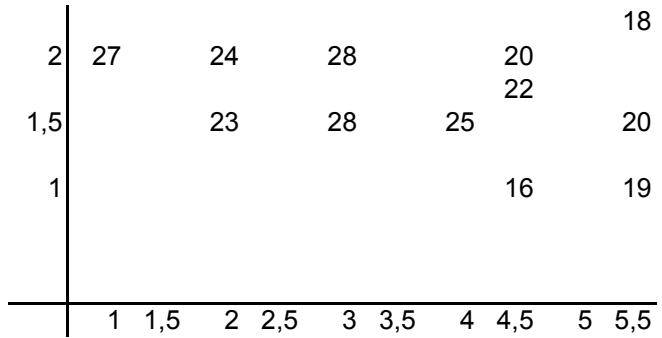
Avlest gasskonsentrasjon (% av LEL) ved lekkasje 2mm diameter

Tid [min]	% av LEL	Høyde Y [m]	Lengde X
1,15	9	1,5	3,05
1,45	11	1,5	3,05
2,3	11	1,5	3,05
3,2	10	1,5	3,05
4,3	14	2	3,05
5	16	2	3,05
6	20	2	3,05
7,3	19	2	2
8,3	23	2	3,5
9	22	1,5	3,5
10,1	21	1,6	4,5
10,45	25	1,75	3,05
11,56	25	2	3,05
13,3	24	2	3,05
14,4	23	1,5	3,05
16,3	20	1,75	4,5
17,3	22	1,75	4,5
18	19	2	4,5
18,45	26	1,8	3,05
20,1	21	1,5	3,05
21,2	23	1,5	2
22,3	24	2	2
24	23	2	0,9
25,3	28	2	3,05
26,4	26	1,5	3,05
27,5	25	1,5	4
29,3	16	1	4,5
30,35	20	2	4,5
31,5	17	2,2	5,5
33	20	1,5	5,5
34,05	19	1	5,5
34,3	18	2,2	5,5
35	28	2	3,05
36,1	28	1,5	3,05
38	28	1,5	3,05
39	27	2	1,1

Gasskonsentrasjon over tid i horisontal avstand 3,05 meter

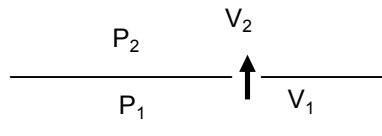
	1,5 m	2 m
0	0	0
1,25	9	
1,75	11	
2,5	11	
3,33	10	
4,5		14
5		16
6		20
12		25
13,5		24
14,66	23	
20,15	21	
25,5		28
26,66	26	
35		28
36,15	28	
38	28	

Gasskonsentrasjon etter likevekt



Vedlegg 11: Beregninger med Bernollis ligning

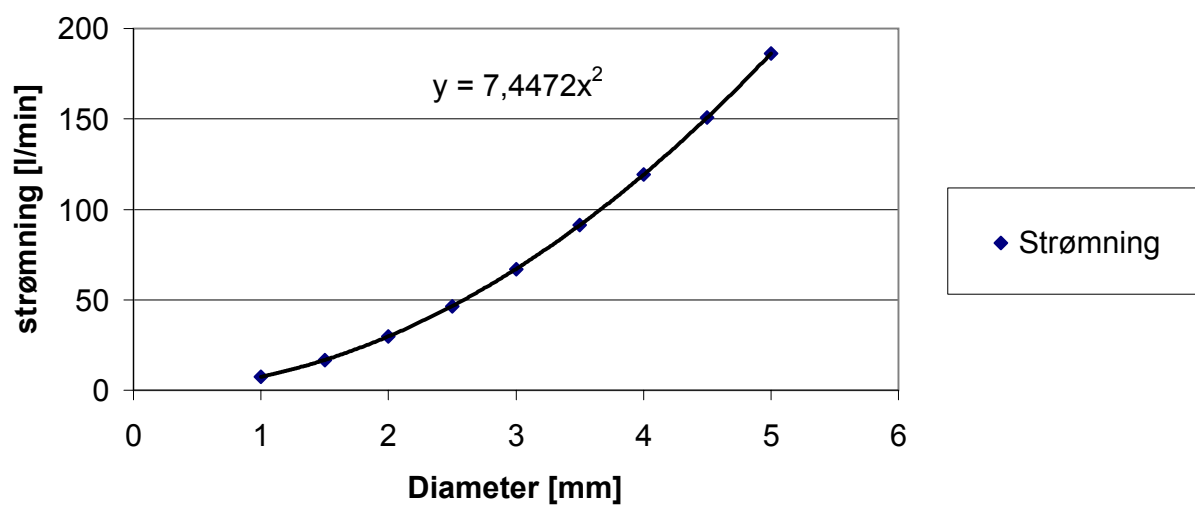
Tetthet		0,8	kg/m ³
P ₁ -P ₂	0,1 bar	10000	Pa
V ₁		0	m/s
V ₂	$\sqrt{(2(P_1-P_2)/\rho)}$	158,113883	m/s



Volumstrøm $Q=V_2 \times A$, der A er areal på lekkasjehull

diameter [mm]	radius [m]	areal [m ²]	Volumstrøm [m ³ /s]	[l/min]
1	0,0005	0,000000785	0,000124119	7,447164
1,5	0,00075	1,76625E-06	0,000279269	16,75612
2	0,001	0,00000314	0,000496478	29,78866
2,5	0,00125	4,90625E-06	0,000775746	46,54477
3	0,0015	0,000007065	0,001117075	67,02448
3,5	0,00175	9,61625E-06	0,001520463	91,22776
4	0,002	0,00001256	0,00198591	119,1546
4,5	0,00225	1,58963E-05	0,002513418	150,8051
5	0,0025	0,000019625	0,003102985	186,1791

Lekkasjerate ved Bernoulli's ligning



Vedlegg 12: Omregningstabell, luft til metan

KROHNE

**CALCULATION PROCEDURE FOR
VARIABLE AREA FLOWMETERS
ACCORDING TO VDI/VDE 3513 PART 1**

Serial number / Order No. : 2//
Professional :

Date: 11.10.2002

CONE-AND FLOAT-DATA

Type: DKGlas6Re
Cone Size: 800
Cone Number: D9.909 .
Float Shape: Kugel/Ball
Float Material: 1.4401
Density of Float: 7,94 g/cm³
Diameter of Float: 6 mm
Mass of Float: 0,9 g
Alpha/Ru-List: Kugeln.aru

PHYSICAL DATA OF FLUIDS/GASES

Origin Fluid	: methane	Origin Fluid	: AIR
Temperature	: 20 °C	Temperature	: 20 °C
Pressure	: 1 bar gauge	Pressure	: 1,013 bar abs.
Density (Standard)	: 0,0007168 kg/l	Density (Standard)	: 1,293 kg/m ³
Density (Operation)	: 0,0013272 kg/l	Density (Operation)	: 1,205 kg/m ³
Viscosity	: 0,0108 mPas	Viscosity	: 0,0108 mPas
Compr. Factor	: 1	Compr. Factor	: 1
Ruppel Number * 10 E-3	: 0,09969	Ruppel Number * 10 E-3:	0,1754
alpha/M	: 0,4278	alpha/M	: 0,449

FLOWLIST

ORIGIN FLOW l/h (STANDARD)	DELTA	REFERENCE FLOW l/h (STANDARD)
600	1,0822	294,55
550	1,0766	268,20
500	1,0711	241,79
450	1,0654	215,44
400	1,0597	189,12
350	1,0539	163,01
300	1,0480	137,03
250	1,0421	111,31
200	1,0361	86,01
150	1,0300	60,94