

Lågtemperaturprovning av halonersättningsmedel

Lars Lindau
Per Nyqvist

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 5075, Lund 2000

Lågtemperaturprovning av halonersättningsmedel

**Lars Lindau
Per Nyqvist**

Lund 2001

Lågtemperaturprovning av halonersättningsmedel

Low-temperature testing of halon replacement agents.

Lars Lindau
Per Nyqvist

Report 5075

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--5075--SE

Number of pages: 77

Keywords:

Clean agents, halon replacements, total flooding system, low temperature

Sökord:

Halonersättningsmedel, rumsskydd, lågtemperaturprovning

Abstract:

This report investigates problems concerning the use of clean agents in a low-temperature environment, i. e. temperatures below the boiling-point of the agent. Three commercially available agents have been included in the tests: HFC-227ea, HFC-236fa and FS49C2.

The results from the tests show that the use of an agent should be avoided at temperatures below its boiling point, although some fire-extinguishing capabilities remain below the boiling-point.

© 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

Sammanfattning

Projektets syfte var att undersöka hur släcksystem med tre olika släckmedel, HFC-236fa, HFC-227ea och FS49C2 fungerar i låga temperaturer. För att kunna utreda detta utfördes fullskaletester i en container på 17 m³ med och utan provbränder utplacerade i containern. Under försöken mättes massflöde och tryck under utströmningen. I försöksutrymmet (containern) mättes koncentrationen av respektive släckmedel, samt temperaturen. Försök genomfördes vid 20, 0, -15 och -30 °C.

Försöken visar att det tar betydligt längre tid att uppnå förväntad koncentration då den omgivande koncentrationen är lika med eller under släckmedlets egen kokpunkt. Fördelningen av släckmedel försämras också så att den förväntade koncentrationen inte riktigt uppnås i samtliga fall, förmodligen beror detta delvis av att turbulensen blir betydligt mindre då temperaturen sänks. Själva utströmningen ur släckmedelsbehållaren fungerade i samtliga fall utmärkt och höll sig inom den uppsatta tidsramen (<10 sekunder).

Då temperaturen sänks under kokpunkten uppträder släckmedlet i huvudsak som vätska och förångningen av släckmedlet tar betydligt längre tid. Det är förmodligen framför allt detta som ligger bakom att fördelningen av släckmedel inte blir lika bra som vid normaltemperatur.

Slutsatserna av försöken blir att man i största möjliga mån bör undvika att använda denna typ av släckmedel under kokpunkten. I de fall detta inte kan undvikas bör man, då man jämför med skadekriterier, tänka på att det tar längre tid, för att uppnå den förväntade koncentrationen. Man bör också vidta åtgärder för att förbättra omblandningen, till exempel genom att öka antalet dysor.

Värdet av att anpassa släckmedelskoncentrationen efter lägsta förväntad temperatur redovisas också.

Summary

The purpose of this project was to investigate how clean agent systems with three different agents, HFC-236fa, HFC-227ea and FS49C2 function at low temperatures. To investigate this full-scale tests in a container of 17 m³ volume were performed. During the experiments pressure and massflow during discharge were measured. Inside the container temperature and agent concentration were measured. The tests were performed at 20, 0, -15 and -30 °C.

The tests show that it takes substantially longer to reach the expected concentrations when the ambient temperature is equal to or lower than the agent's boiling point. The distribution of agent is also substantially more uneven, so that the expected concentration wasn't reached in all tests, in part probably because there is less turbulence during discharge at lower temperatures. The discharge from the agent container worked flawlessly at all temperatures and was within the time criteria (<10 seconds).

When the temperature is lowered beyond the boiling point the liquid fraction of the agent is initially higher. The vaporization of the agent takes longer time at these temperatures.

The conclusions drawn from these tests are that one should avoid using a clean agent at temperatures lower than the boiling point. In the case that this is not avoided an extra time of 40-50 seconds before extinguishing concentration is reached must be added to the calculations when comparing to damage criteria. One should also take measures to improve distribution of agent, for example by increasing the number of nozzles.

The usefulness of adjusting the amount of agent to the lowest expected temperature of the enclosure is also demonstrated.

1 INLEDNING	1
1.1 SYFTE.....	1
1.2 METOD.....	1
1.3 AVGRÄNSNINGAR.....	1
1.4 UPPDRAGSGIVARE.....	1
1.5 ERKÄNNANDEN.....	1
2 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH FÖRSTUDIER.....	3
2.1 OZONPROBLEMATIKEN	3
2.2 HALONERSÄTTNING	3
2.3 BESKRIVNING AV SLÄCKMEDEL	3
DE TRE SLÄCKMEDLEN SOM INGÅR I FÖRSÖKEN ÄR HFC-236FA, HFC-227EA SAMT FS49C2. DE TVÅ FÖRSTNÄMNDNA BESTÅR AV EN ENDA KEMISK FÖRENING, MEDAN DEN SISTA ÄR EN BLANDNING AV FLERA OLIKA SUBSTANSER.	3
2.3.1 HFC-236fa.....	3
Beskrivning	3
Användningsområde.....	3
Toxicitet	4
Fysikaliska data för HFC 236fa [2]	4
2.3.2 HFC-227ea	6
Beskrivning	6
Användningsområde.....	6
Fysikaliska data	6
Toxicitet	6
2.3.3 FS49C2.....	8
Beskrivning	8
Användningsområde.....	8
Fysikaliska data	8
Toxicitet	8
2.2 ALLMÄNT OM DIMENSIONERING	9
2.3 DIMENSIONERING AV SLÄCKMEDELSMÄNGD	9
2.4 DIMENSIONERING AV RÖRSYSTEM.....	10
2.5 BESKRIVNING AV FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	11
2.5.1 Effunc-apparaten.....	12
2.5.2 Temperaturmätning	12
2.5.3 Koncentrationsmätningar	13
2.5.4 Provbränder.....	13
2.6 DISKUSSION OCH PROBLEM.....	13
3 NORMALTEMPERATURFÖRSÖK	15
3.1 ALLMÄNNA IAKTTAGELSER	15
3.2 RESULTAT FRÅN FÖRSÖK.....	15
3.2.1 Koncentrationsmätningar	15
3.2.2 Utströmningstid.....	17
4 KÖLDFÖRSÖK	19
4.1 IAKTTAGELSER VID FÖRSÖKEN.....	19
4.2 UTSTRÖMNINGSTID	19
4.3 SLÄCKMEDELSFÖRDELNING.....	19
4.4 VÄTSKEFASENS UPPTRÄDANDE.....	20
4.5 SLÄCKFÖRMÅGA I VÄTSKEFAS.....	20
4.6 FÖRÅNGNING UNDER UTSTRÖMNING.....	20
4.7 VÄTSKEDROPPARS BETEENDE	21
4.8 ADIABATISK FÖRÅNGNING OCH JAKOBS TAL	21
4.9 SLUTSATSER ANGÅENDE SLÄCKMEDELSFÖRDELNINGEN	22
4.10 SLÄCKMEDELSKONCENTRATIONENS TEMPERATURBEROENDE	22
4.11 SLÄCKFÖRMÅGA.....	24
4.12 SIKTBARHET	24

4.13 RESULTAT FRÅN FÖRSÖK VID 0 °C	25
4.13.1 Koncentrationsmätningar	26
4.14 RESULTAT FRÅN FÖRSÖK VID -15 °C	28
4.14.1 Koncentrationsmätningar	29
4.15 RESULTAT FRÅN FÖRSÖK VID -30 °C	31
4.15.1 Koncentrationsmätningar	32
5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	35
5.1 SLUTSATSER ANGÅENDE SLÄCKMEDLENS UPPFÖRANDE I LÅGA TEMPERATURER	35
5.2 SLUTSATSER OCH RIKTLINJER FÖR DIMENSIONERING	35
REFERENSER:.....	37
APPENDIX A.....	B
UTDATA FRÅN FÖRSÖK.....	B
<i>Massflöden för respektive släckmedel vid olika temperaturer.....</i>	<i>B</i>
<i>Koncentrationsmätningar för respektive släckmedel vid de olika försökstemperaturerna.....</i>	<i>D</i>
<i>Diagram över tryckmätning för respektive släckmedel.....</i>	<i>J</i>
<i>Diagram över temperaturmätningarna för varje försök.....</i>	<i>L</i>
<i>Diagram över påförd släckmedelsmängd.....</i>	<i>W</i>
APPENDIX B	AA
<i>Ångtryckets temperaturberoende</i>	<i>AA</i>
<i>Tabeller över ångtrycket för HFC-227ea och HFC-236fa</i>	<i>AA</i>
APPENDIX C	CC
<i>Släckmedelsdroppars uppträdande.....</i>	<i>CC</i>
<i>Beräkning av en hypotetisk droppe under utströmningen</i>	<i>EE</i>

1 Inledning

1.1 Syfte

Syftet med försöken är att utreda hur halogenerade kolvätens släckförmåga och uppträdande påverkas av en sjunkande omgivningstemperatur. Temperaturomfånget i försöken kan sägas överensstämma med de temperaturer som kan tänkas uppkomma i t ex ett stridsfordon i svenskt vinterklimat. Rapporten utfördes i kursen VBR 135, problembaserad brandteknisk riskhantering.

1.2 Metod

För att undersöka uppförandet av släckmedlen utfördes fullskaletest av system dels i normaltemperatur (20 °C) och dels i temperaturer ner till –30 °C. Dessa temperaturer uppnåddes genom att placera försöksutrustningen i ett kylrum. Litteraturstudier inom ämnesområdet genomfördes också.

1.3 Avgränsningar

Det görs inte någon bedömning av vilken typ av brandscenario som skulle kunna vara relevant. Försöken utförs inte utifrån något givet skyddsmål utan syftar till en allmän förståelse för problematiken då denna typ av släcksystem utsätts för låga temperaturer.

1.4 Uppdragsgivare

Försöken utförs som ett samarbete mellan LTH-brandteknik och Försvarets Materielverk.

1.5 Erkännanden

Författarna vill rikta ett speciellt tack till följande personer och företag för deras hjälp under arbetet med denna rapport.

Professor Göran Holmstedt, Brandteknik LTH och Brandingenjör Johan Åqvist, Försvarets Materielverk, för deras arbete som handledare.

Ingenjör Sven-Ingvar Granemark, Brandteknik LTH för assistans med material och mätutrustning.

Personal vid Bejaro AB, Löddeköpinge, för hjälp med försöksutrustning.

2 Förutsättningar och förstudier

2.1 Ozonproblematiken

Problemet med ozonlagrets förtunning i atmosfären är en global fråga som har fått stor internationell uppmärksamhet. Både CFC gaser, HFC gaser och haloner har en skadlig inverkan på det ozonskikt som finns i stratosfären. Detta skikt spelar en stor roll i skyddet mot skadlig UVB strålning som annars träffar jordytan. Allt solljus innehåller UVB men i för höga halter påverkas den mänskliga hälsan, till exempel genom hudcancer. För höga halter av UVB har också visat sig ge effekt på växter, det marina ekosystemet samt på många material.

Problemet med de ovan nämnda gaserna är att de ofta innehåller en Br eller Cl atom. Då molekylerna angrips av solljus med tillräckligt hög energi (kort våglängd), splittras molekylerna och den fria atomen kan sedan angripa och förstöra en mycket ansenlig mängd ozonmolekyler. På detta vis skapas det underskott eller "hål" som har uppmärksamats de senaste årtiondena.

2.2 Halonersättning

Sedan Sverige skrev under Montrealprotokollet 1987 där användningen av halon 1211 och 1301 förbjuds har flera olika gasformiga släckmedelsalternativ kommit fram på marknaden. I denna rapport behandlas tre av dessa, HFC-236fa, HFC-227ea samt FS49C2 (80% CF_3CHF_2 , $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ och CO_2). De är alla tryckkondenserade gaser med en kokpunkt under 0 °C, de är inte elektriskt ledande, de är alla ofarliga vid släckande koncentration och kan användas i ett befintligt halonsystem med vissa mindre justeringar (antal släckmedelsbehållare, annandysa osv.).

De nya halonalternativen ställer högre krav på en riktig dimensionering då de inte har samma fysikaliska och kemiska egenskaper som tex halon 1301 har. Förhöjd kokpunkt, toxiska egenskaper och högre släckkoncentration är några av de saker som måste tas hänsyn till vid en jämförelse mellan eller till exempel vid en dimensionering av återfyllning av ett halonsystem med en alternativ HFC-gas. I denna rapport är det främst temperaturområdet i vilket de olika gaserna är verksamma som undersöks.

2.3 Beskrivning av släckmedel

De tre släckmedlen som ingår i försöken är HFC-236fa, HFC-227ea samt FS49C2. De två förstnämnda består av en enda kemisk förening, medan den sista är en blandning av flera olika substanser.

2.3.1 HFC-236fa

Beskrivning

HFC-236fa är en tryckkondenserad gas utan något regelverk vad gäller tillverkning och användning. Gasens kemiska namn är $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$ (hexafluoropropan). Den marknadsförs som ett halonalternativ både till fasta släcksystem men också till handbrandsläckare. HFC-236fa är icke korrosivt, har ingen elektrisk konduktivitet och saknar nedbrytningsförmåga för ozon ($\text{ODP} = 0$). Ångtrycket och kokpunkten är liknande de för halon 1211. HFC-236fa har också en låg egentoxicitet.

Användningsområde

HFC-236fa rekommenderas av tillverkaren för användning i portabla handbrandsläckare för utrymmen med dyrbar och känslig utrustning, till exempel datorhallar, telekommunikationscentraler och andra känsliga installationer. Gasen är testad för europeisk

standard BS EN3. HFC-236fa kan också användas för rumsskydd med utsläppspunkten riktad mot trolig antändningskälla, till exempel för användning i ett motorrum i fordon.

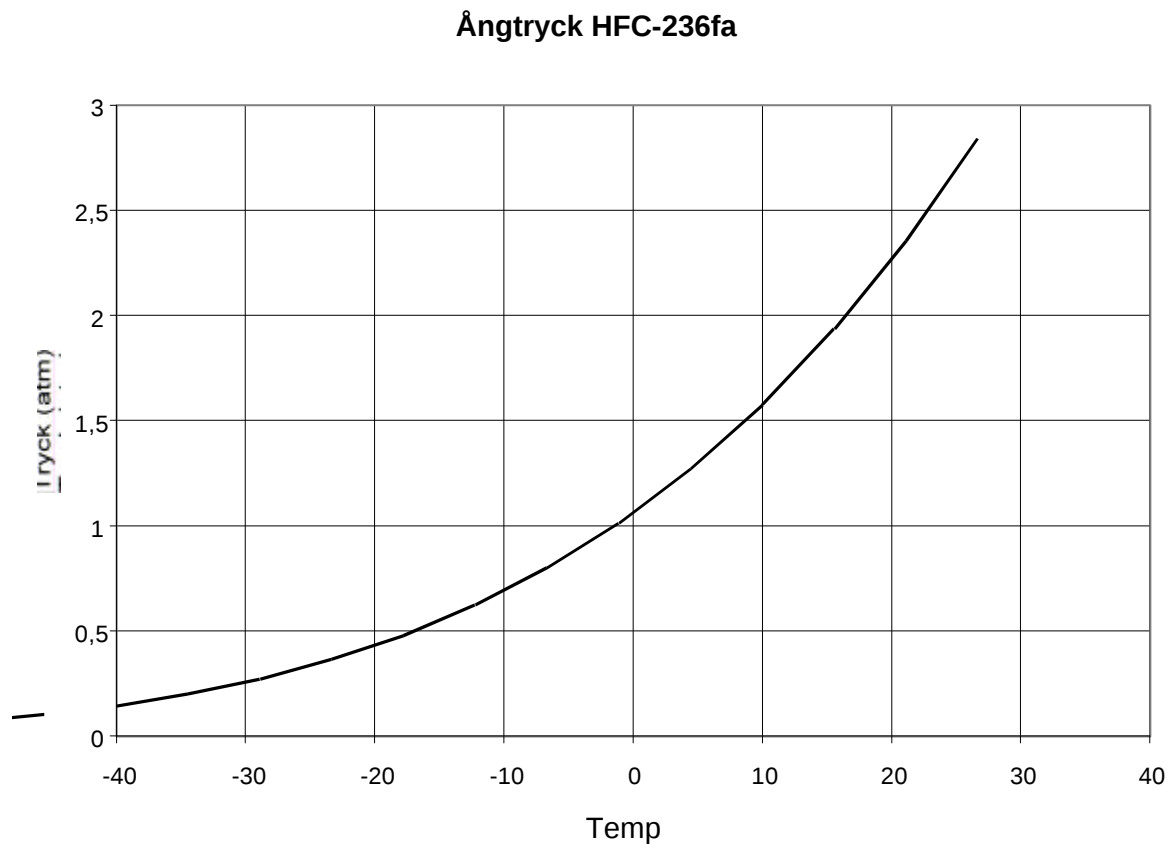
Toxicitet

HFC-236fa uppvisar inga kliniska tecken på toxicitet i de tester som har genomförts, även gentoxiska tester. Tester visar 10% No Adverse Effect Level (NOAEL) och 15% Lowest Adverse Effect Level (LOAEL).

Fysikaliska data för HFC 236fa [2]

Molekylvikt	152,04
Kokpunkt vid 1 atm, °C	-1,4
Frys punkt, °C	-103
Form	: Tryckkondenserad gas
Färg	: Färglös
Kritisk temperatur, °C	124,9
Kritiskt tryck, kPa	3200
Kritisk densitet, kg/m ³	555,3
Densitet, vätska, vid 25°C, kg/m ³	1360
Densitet, ånga, vid 25°C och 1 atm, kg/m ³	6,430
Sp. värmekapacitet, mättad vätska (Cp) vid 25°C, kJ/kg °C	1,1085
Sp. värmekapacitet, mättad ånga (Cp) vid 25°C och 1 atm, kJ/kg °C	0,8444
Ångtryck, mättat vid 25°C, kPa	272,4
Ångbildningsvärme vid kokpunkt, kJ/kg	160,4
Termisk konduktivitet, vätska vid 25°C, W/m . °C	0,0745
Termisk konduktivitet, ånga vid 25°C , W/m . °C	0,0042
ODP (CFC-11 = 1)	0
HGWP (CFC-11 = 1)	4,2
GWP (100 år för CO ₂ , GWP = 1)	6300
Inhalation Exposure Limit AEL ppm (v/v) (8- and 12-hr TWA)	1000
No Observed Adverse Effect Level (NOAEL), %	10
Lowest Observed Adverse Effect Level (LOAEL) %	15
Approximate Lethal Concentration (ALC), ppm	>189000
Atmosfärisk livstid ,år	209

Ångtryckskurva för HFC-236fa.



Ångtryckskurva för HFC-236fa. Källa:[10]

2.3.2 HFC-227ea

Beskrivning

HFC227ea är en tryckkondenserad gas som är ett vanligt förekommande alternativ till halon. Den kemiska formeln är $\text{CF}_3\text{CHFCF}_3$ (1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropan). Det är en växthusgas utan förmåga till ozonnedbrytning. Gasen används bland annat som drivgas i medicinska applikationer, exempelvis astmasprayer.

Användningsområde

HFC227ea används i brandsläckningssammanhang som gas i system för rumsskydd. Användningsområden är utrymmen med dyrbar och känslig utrustning, tex datorhallar, telekommunikationscentraler och andra känsliga installationer.

Fysikaliska data

Uppgifterna i nedanstående avsnitt är hämtade ur materialdatablad ifrån Great Lakes Chemical Corp. förutom där annat anges.

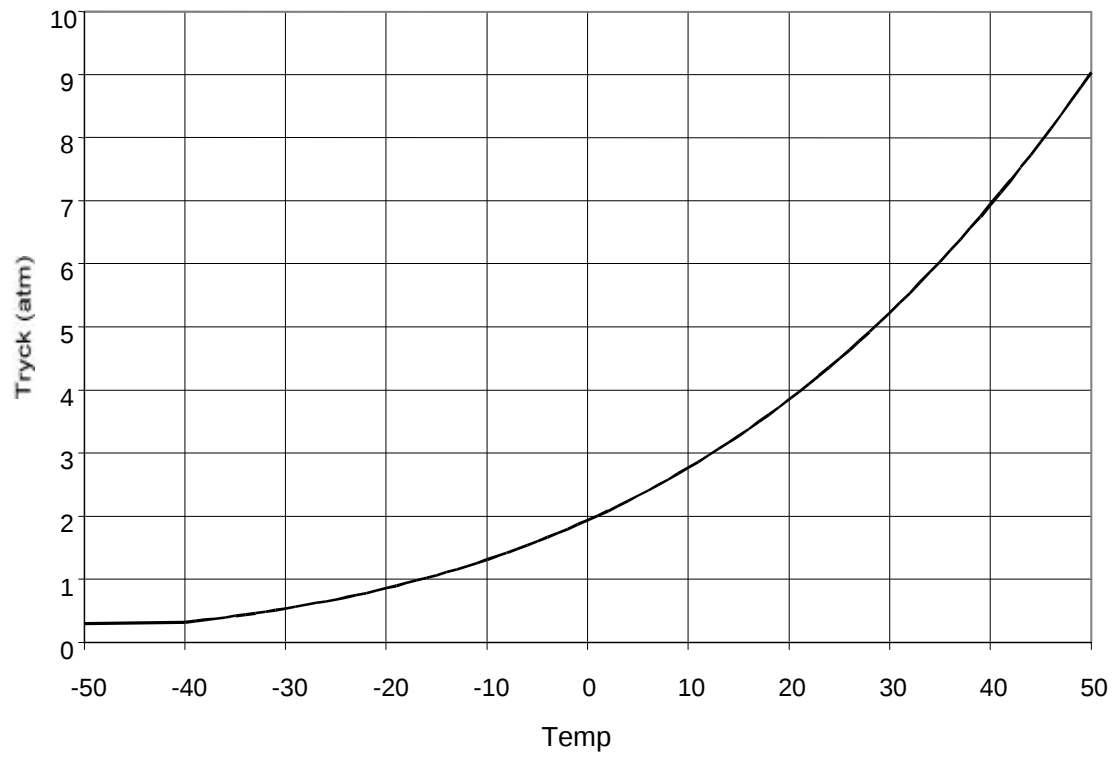
Toxicitet

HFC-227ea uppvisar inga kliniska tecken på toxicitet i de tester som har genomförts, även gentoxiska tester. Tester visar 9% No Adverse Effect Level (NOAEL) och 10,5% Lowest Adverse Effect Level (LOAEL).

Molekylvikt	170,03
Kokpunkt vid 1atm, °C	-16,4
Frys punkt, °C	-131
Form : Tryckkondenserad gas	
Färg : Färglös	
Kritisk temperatur, °C	101,6
Ångtryck vid 20°C, kPa (58.8 psia vid 70 F)	303,9
Kritiskt tryck, kPa	2909,6
Kritisk volym, m ³ /kg	0,0016
Kritisk Densitet, kg/m ³	620,8
Sp. värmekapacitet, mättad vätska (Cp) vid 25 °C, kJ/kg °C	1,1853
Sp. värmekapacitet, mättad ånga (Cp) vid 25 °C, kJ/kg °C	0,860
Sp. värmekapacitet, överhettad ånga (Cp) vid 1 atm, 25 °C, kJ/kg °C	0,8089
Ångbildningsvärme vid kokpunkt, kJ/kg	132,5
Termisk konduktivitet, Vätska vid 25 °C, W/m °C	0,0692
Termisk konduktivitet, Ånga vid 25 °C, W/m °C	0,0126
ODP (CFC-11 = 1)	0 ^x
HGWP (CFC-11 = 1)	0,5-0,8 ^x
GWP (100 år för CO ₂ , GWP = 1)	2000-3000 ^x
Inhalation Exposure Limit AEL ppm (v/v) (8- and 12-hr TWA)	
No Observed Adverse Effect Level (NOAEL), %	9
Lowest Observed Adverse Effect Level (LOAEL), %	10,5
Approximate Lethal Concentration (ALC), ppm	
Atmosfärisk livstid, år	31-42 ^x

Uppgifter markerade med ^x är tagna ur [4]

Ångtryck HFC-227ea



Ångtryckskurva för HFC-227ea. Källa: [9]

2.3.3 FS49C2

Beskrivning

FS49C2 är en blandning av gaserna HFC-134a (ca 80%), HFC-125 och CO₂ (sammanlagt ca 20%) [6]. Denna gasblandning säljs på den amerikanska marknaden med SF₆ som en ingående komponent. I Sverige är SF₆ borttaget av miljöhänsyn och gasen säljs med beteckningen FS49C2. Kemiska formler för blandningen är CF₃CHF₂, CF₃CH₂F samt CO₂.

Användningsområde

Tillverkning och användning av den här gasblandningen är inte reglerad. Blandningen används i system för rumsskydd, så kallade "total flooding system".

Fysikaliska data

Uppgifter i nedanstående kapitel är hämtade ur [8].

Toxicitet

De siffror som finns visar >8% No Adverse Effect Level (NOAEL) och >10% Lowest Adverse Effect Level (LOAEL).

Molekylvikt	99,49
Kokpunkt vid 1 atm, °C	(-26,3 till -78)
Frys punkt, °C	
Form	: Tryckkondenserad gas
Färg	: Färglös
Kritisk temperatur, °C	86
Kritiskt tryck, kPa	
Kritisk densitet, kg/m ³	
Densitet, vätska, vid 25°C, kg/m ³	1190
Densitet, ånga, vid 25°C and 1 atm, kg/m ³	
Sp. värmekapacitet, mättad vätska (Cp) vid 25°C, kJ/kg °C	
Sp. värmekapacitet, mättad ånga (Cp) vid 25°C (1 atm), kJ/kg °C	
Ångtryck, mättat vid 20°C, bar absolut	14,9
Förångningsvärme vid kokpunkten, kJ/kg	
Termisk konduktivitet, vätska vid 25°C, W/m . °C	
Termisk konduktivitet, ånga vid 25°C , W/m . °C	
ODP (CFC-11 = 1)	0
HGWP (CFC-11 = 1)	0,35
GWP (100 år för CO ₂ , GWP = 1)	1388
Inhalation Exposure Limit AEL ppm (v/v) (8- and 12-hr TWA)	
No Observed Adverse Effect Level (NOAEL),	>8
Lowest Observed Adverse Effect Level (LOAEL)	>10
Approximate Lethal Concentration (ALC)**, ppm	
Atmosfärisk livstid (år)	<40

2.2 Allmänt om dimensionering

De släckmedel som ingår i försöken som omfattas av denna rapport är alla avsedda att ersätta Halon 1301 som en "total flooding agent" eller rumsskydd. Detta innebär att de är släckmedel som dunstar utan att efterlämna några rester, och att de släpps ut i en volym, till exempel ett rum, för att uppnå flamsläckning i hela volymen. Då man byter ut Halon 1301 mot något annat släcksystem, inte nödvändigtvis någon av de som ingår i denna studie, måste man ta hänsyn till de ändrade förutsättningarna. Utifrån en jämförelse av samtliga relevanta egenskaper hos släckmedlen kan man ta ett beslut. Dessa egenskaper kan till exempel vara:

- Nedbrytningsprodukter och rester (speciellt vid brand)
- Utrymmeskrav (samtliga ersättningar tar mer plats än det ursprungliga Halon 1301-systemet)
- Pris på släckmedel samt "hårdvara", till exempeldysor och nytt rörsystem.
- Aktiverings- och utlösningstid, jämfört med skadekriterier på skyddsobjektet

Bland dessa olika faktorer ingår som en del vilken temperatur man kan förutsätta råder i utrymmet då systemet löser ut. Handlar det om ett system inomhus kan man vara ganska säker på att temperaturen håller sig kring 20 °C, men om det handlar om till exempel ett stridsfordon kan temperaturen förutsättas variera inom ett visst intervall. För de släckmedel som omfattas av försöken kan man förmoda att det uppstår problem, dels genom att trycket i behållarna sjunker och dels genom att släckmedlet ifråga kan komma att användas under kokpunkten, vilket kan leda till att släckmedlet i huvudsak förekommer som vätska istället för, som avsetts vid dimensioneringen, som gas.

Det förtjänar dock att upprepas att temperaturintervallet bara är en faktor av många vid val av släcksystem. Påverkan av denna faktor är av den nuvarande litteraturen att döma inte så väl undersökt.

2.3 Dimensionering av släckmedelsmängd

Det finns ingen svensk norm för denna typ av släckmedel. Därför har NFPA 2001 använts så långt det går för dimensionering av släckmedelsbehovet. Detta sätt kan endast användas för att dimensionera HFC 236 och HFC 227, eftersom FS49C2 ej finns upptagen i denna norm. För denna kan istället en dimensionerande koncentration antas vara 0.56 kg/m³, eller 12 %. Dimensionerande koncentration för de andra två beräknas med en säkerhetsmarginal på 130 % av det s k cupburnervärdet:

Namn	Cupburner (%)	Dimensionerande konc (%)
HFC-236fa	6.3	8.2
HFC-227ea	6.5	8.5

Nu kan den totala mängden släckmedel, W , beräknas. Containern har en volym på 17 m³. I beräkningen antas omgivningens temperatur till 293 K. Behovet beräknas enligt följande formel:

$$W = \frac{V}{s} \left(\frac{C}{100 - C} \right)$$

där C betecknar dimensionerande koncentrationen beräknad enligt ovan, s betecknar ämnets specifika volym och V betecknar containerns volym. Resultatet blir enligt följande:

Namn	Behov (kg)	Specifik volym (m ³ /kg)	Volym (l)
HFC-236fa	9.8	0.15	10.3

HFC-227ea	11.3	0.14	9.8
FS49C2	9.4		11.1

Det kan vara värt att notera att den dimensionerande koncentrationen är beroende av temperaturen. Vid en lägre temperatur kommer det att behövas en större mängd släckmedel för att komma upp i samma koncentration som vid rumstemperatur. I dimensioneringen har ingen hänsyn tagits till detta, eftersom man då skulle låsa sig vid vilken temperatur man ska använda en specifik behållare med släckmedel, vilket blir opraktiskt. Samtliga behållare har alltså dimensionerats för 20 °C. Istället kan man räkna om den dimensionerande koncentrationen till att gälla den aktuella temperaturen, så att man får fram en förväntad koncentration vid aktuell temperatur. Det allmänna beteendet hos släckmedlet vid en specifik temperatur förväntas inte påverkas nämnvärt av den lilla förändringen i koncentration som denna justering skulle medföra.

Den dimensionerande koncentrationen är dessutom endast giltig för det bränsle som användes vid cupburner-försöken, vanligtvis heptan. Man kan därför diskutera enligt vilka värden man ska dimensionera, men det omfattas inte av denna rapport och redovisas därför inte här. För en sådan diskussion hänvisas till exempel till *Utvärdering av...* [4] samt SFPE *Handbook of...* [1].

2.4 Dimensionering av rörsystem

Då ett släcksystem dimensioneras måste man ta hänsyn till rörsystemets utformning. Påföringstiden bör bli max 10 sekunder. Problemet vid beräkning av erforderliga dimensioner är att det är mycket svårt att med ekvationer beskriva utströmningen. Det beror dels på att trycket i behållaren inte är konstant och dels på att en del av släckmedlet snabbt förångar vilket ger en tvåfasströmning. *INFA 2001* [3] ges inga anvisningar om dimensioneringen av rörsystem utan hänvisar endast till tillverkarens specifikationer. I *NFA 12A* [5] däremot ges en empirisk iterativ metod för att beräkna erforderlig rördiameter. En dimensionering enligt denna metod ger en rördiameter på strax under 15 mm för en maximal utströmningstid enligt ovan vid 20 °C.

I [5] ges också en metod för att beräkna den mängd släckmedel som blir kvar i rörsystemet. Det visar sig att denna mängd blir försumbar under de förhållanden som råder i det aktuella försöket.

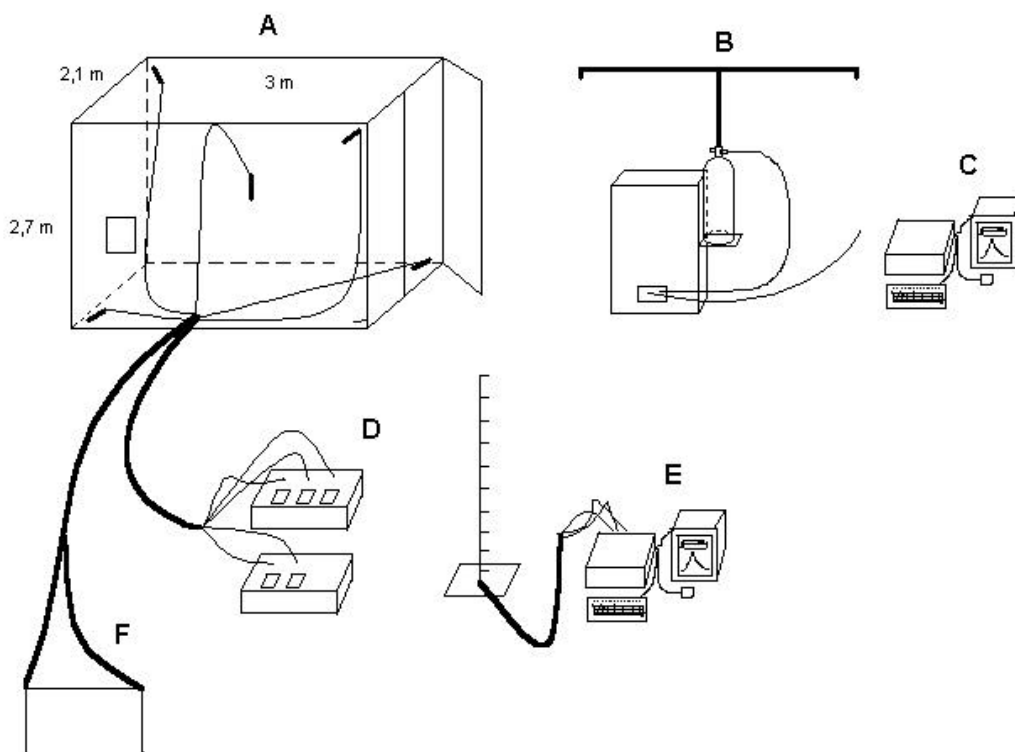
Man bör också fundera över hur många munstycken som behövs för att påföra släckmedlet. Eftersom släckmedlet i normala fall snabbt förångas behöver det inte påföras direkt på branden, då släckmedlet snabbt når alla dolda utrymmen. I försökssuppställningen är utrymmets volym ca 17 m³. Vid jämförelse med andra försök i [5] och i diskussion med leverantörer visar det sig att det bör vara fullt tillräckligt med en dysa i utrymmet. Vill man få en snabbare och jämnare spridning i rummet kan man använda fler dysor. Detta beror på utrymmets geometri mm. De dysor som användes i försöken var 2 st fyrvägsdysor, cirkulära, med en invändig minsta diameter på ca 8,5 mm.

I försöket användes ett ¾" rörsystem med dimensionerna 0,73 resp. 2 m. Se figur 2.2 för en närmare beskrivning av rörsystemet.

Vad gäller ventiler förekom två olika ventiler i försöket; en ¾" kulventil samt en 12 mm Schmöleventil (85 D 15 ; 85 D 175) Den förstnämnda sorten användes vid försök med FS49C2 och HFC-227ea, medan den sistnämnda användes med HFC-236fa. Förutom att Schmöleventilen hade en betydligt mindre innerdiameter så var den dessutom horisontell, vilket medförde att en extra 90°-bøj fick monteras på rörsystemet.

På rörsystemet monterades även en tryckgivare. I fallet med HFC-227ea och FS49C2 monterades denna strax innan kulventilen. Av praktiska skäl var samma lösning omöjlig att genomföra på HFC-236, varför tryckgivaren monterades strax efter ventilen istället. Detta innebär att behållarna med HFC-236fa hade ett högre starttryck vid varje försök. Den annorlunda utformningen av ventilen innebar dock, vilket visas i tryckdiagrammen i respektive resultatkapitel, att tryckbilderna blev samma för alla släckmedlen vid försöken.

2.5 Beskrivning av försöksuppställning



Figur 2.1. Skiss över hela försöksuppställningen med beteckningarna **A** försökscontainer med mätpunkter, **B** Effunc, mätenhet för vikt och tryck på vilken släckmedelsbehållare och rörsystem monterades, **C** mät dator kopplad till Effunc, **D** koncentrationsmätare, **E** termoelement kopplade till mät dator, **F** värmepump till förvärmningsslingor.

Försöksuppställningen beskrivs översiktligt i bild 2.1 Utrymmet som fylls med släckmedel är en container i stål (A i figur 2.1) med en invändig volym av 17 m^3 . Inermått är $3 \times 2,1 \times 2,7 \text{ [m]}$ (L x B x H). Inne i denna placerades ett släcksystem (figur 2.2) tillsammans med den mätutrustning som användes. I nederkant, på ena långsidan av containern, gjordes en öppning för genomföring av slang och kabel till försöksutrustning. Denna genomföring tätades sedan under själva försöken. För att kunna skydda containern mot det övertryck som bildades vid aktivering av systemet, togs en tryckavlastningslucka upp i containerväggen. Denna lucka finns markerad i A i figur 2.1. Storleken på luckan var $40 \times 40 \text{ cm}^2$ och den var självstängande, försedd med en tätningslist, för att minimera läckage. Belysning inne i containern monterades också.

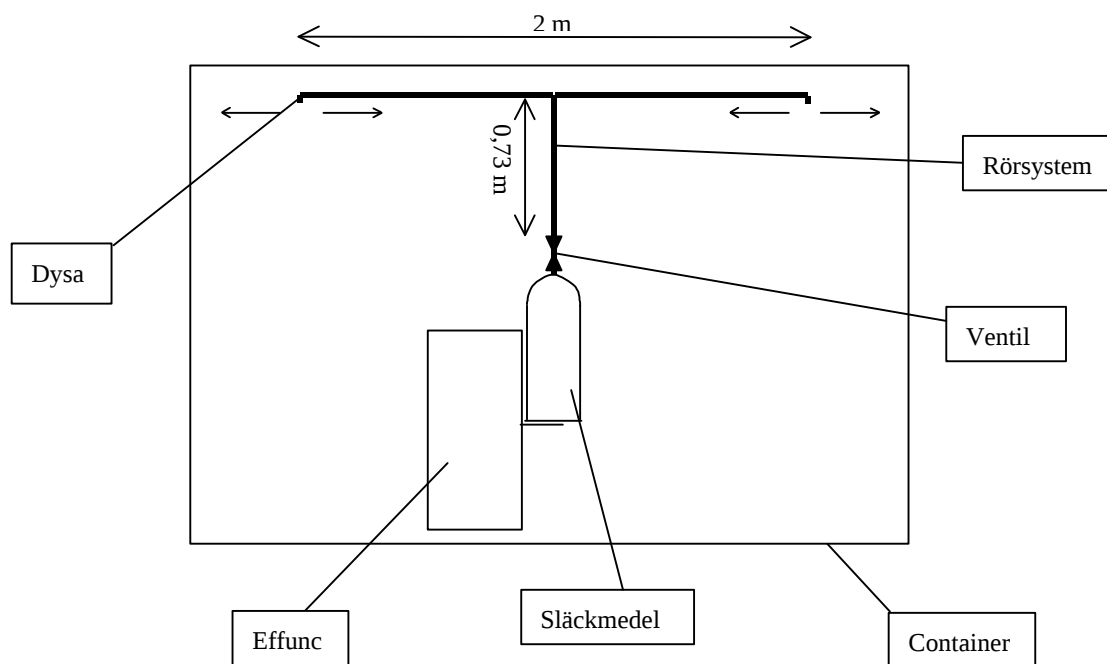


Fig. 2.2 Skiss över släckmedelssystemets placering under försöken.

En videokamera placerades också inne i containern för att visuella bedömningar av siktbarhet och eventuell fasövergång från vätska till gas skulle kunna iakttas utan att någon person befann sig i containern. Denna kamera placerades på golvet riktad uppåt i de första försöken, men flyttades sedan upp till en högre nivå för att fasövergången viddysorna skulle kunna observeras.

Under försöket mättes utströmningskaraktäristika och fördelningen av släckmedel i rummet. För att uppnå det förstnämnda mättes trycket i utströmningsröret strax efter ventilen samt viktnedgången över tiden. Dessa två parametrar mäts ungefär 4 gånger per sekund. För att kunna bedöma hur släckmedlet fördelade sig i rummet mättes koncentrationen i fem punkter i rummet. Detta gjordes med hjälp av en kontinuerligt samplande mätare som suger luft genom slangar till en mätcell. Luften som sugas till mätaren förvärmades för att inga droppar av släckmedel i vätskefas skulle kunna sugas in i mätcellen.

2.5.1 Effunc-apparaten

Effunc-apparaten (B i figur 2.1) är tillverkad av SP, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, för att testa handbrandsläckare. Den kopplas till en dator (C i fig.2.1) som lagrar värden för tryck och vikt i en datafil tills försöket avslutas genom en knapptryckning. Fördelen med att använda denna apparat är att den kan användas för öppning av flaskventil med hjälp av en befintlig tryckluftskolv. Själva släckmedelsbehållaren hålls med en tving fast på en platta som är upphängd på en lastcell. Denna lastcell klarar som mest ca 50 kg belastning. Under utströmningen kommer reaktionskrafter att uppstå. Det är viktigt att rör och dysor monteras så att dessa reaktionskrafter kan tas upp utan att påverka lastcellen. Under försöken placeras hela apparaturen inuti containern, inplastad för att undvika att kondens påverkar elektroniken, och en sladd förbinder den med datorn som loggar de ovan nämnda parametrarna.

2.5.2 Temperaturmätning

Under försöket mättes temperaturen på tio olika höjder i försöksutrymmet (E i fig. 2.1) samt i de fem kopparrör som sög in luftprover. Temperaturmätningen i rummet avsåg främst att avgöra hur stor temperatursänkningen i utrymmet blev vid utlösning av systemet samt om det bildades några distinkta skiktningar i luft-släckmedelsblandningen. I rummet mättes temperaturen genom ett termoelementtråd med 25 cm mellan varje termoelement (E i fig. 2.1). Temperaturmätningen i luftprovrrören avsåg att säkerställa och övervaka så att

förvärmningen fungerade tillfredsställande så att allt släckmedel i vätskefas omedelbart förångades då den sögs in i luftprovsvrören.

För att kunna avgöra huruvida de provbränder som placerats i försöksutrymmet släcktes eller fortsatte brinna placerades även termoelement ovanför provbränderna, i flammen. Även detta fungerade utan anmärkning.

Eftersom släckning erhöles inom utströmningstiden i samtliga fall redovisas inte temperaturkurvorna för provbränderna. Rumstemperaturen redovisas som en medeltemperatur för hela rummet under hela försökstiden (900 sekunder) samt uppdelat på de tio kanalerna (de olika höjderna i rummet) för försökets första 200 sekunder, detta på grund av läsbarhetsskäl.

2.5.3 Koncentrationsmätningar

För att mäta fördelningen av släckmedel monterades 5 st samplerrör i utrymmet. Dessa förvärmades med hjälp av en uppvärmd vattentank samt en pump, som placerades i en isolerad låda i provutrymmet (F i fig.2.1). Detta vatten strömmade förbi kopparrör som monterats i utrymmet (A i fig.2.1) och återcirkulerades sedan till tanken. Detta medförde att kopparrören höll en temperatur på 30-40 °C. Dessa kopparrör användes sedan för att ta luftprover i utrymmet, vilka sögs vidare in i två koncentrationsmätare (2 + 3 kanaler)(D i fig. 2.1). På så vis säkerställdes att släckmedlet förångades så fort det kom in i samplerröret. Alla slangledningar inne i containern och hela vägen fram till normaltempererat område, isolerades också för att förhindra återkondensation under transport ut ur kylrummet. De mätningar som apparaten genomförde skrevs ut på en pappersremsa för varje kanal. Dessa har sedan tolkats så att resultaten kan redovisas som diagram i appendix A.

2.5.4 Provbränder

För att kontrollera att en släckande koncentration erhöles i försöket, placerades fyra stycken mindre provbränder på olika nivåer i containern. Två stycken placerades på golvnivå varav den ena täcktes av ett "tak" för att inte ej förångat släckmedel i form av vätskedroppar skulle kunna släcka genom direkt kylning av vätskeytan. De övriga två placerades på en höjd av 110 cm samt 160 cm över golvnivå. Bränslet som användes för dessa provbränder var heptan. För att kunna konstatera när branden var släckt placerades termoelement ovanför respektive vätskeyta och sedan kunde direkt konstateras under försökets gång när varje brand var släckt. Diametern på de kärl som användes var 10-12 cm i diameter. Större kärl hade givit en ökad mängd brandgaser vilket i sin tur hade givit en kraftigt ökad produktion av nedbrytningsprodukter, bla HF-molekyler. Detta ville undvikas varför större kärl inte användes. Förbrinntiden sattes till 60 sekunder, men eftersom det var mycket svårt att få eld på provbränderna i -30 °C, blev förbrinntiden i vissa fall något längre.

2.6 Diskussion och problem

Förutom problemet med reaktionskrafter under utströmningen är luftsamplern det största problemet. Då luft transporteras genom slangar och även kopparrör (för förvärmning) av varierande diameter, så kommer inte en förekomst av släckmedel inuti containern att ge utslag omedelbart. Det kommer med andra ord att finnas en viss fördröjning mellan verkligheten och det som visas på mätaren. Samplern har en sugkapacitet på 1,5 liter per minut enligt tillverkaren. Vid försöken har 20 m provslang med en innerdiameter på 3 mm använts. Detta ger en teoretisk fördröjning på ca 25 sekunder fram till mätaren.

Vidare skriver mätaren bara en mätpunkt per sex sekunder. Det skulle vara önskvärt att kunna få data med ett kortare tidsintervall, men även denna metod bör kunna ge en god uppfattning av hur släckmedlet uppför sig. För att kunna ge en tidsuppskattning i diagrammen som redovisas i rapporten har den sista punkten på mätremsan som visar 0 % släckmedel använts som tiden 0 s vid redovisning av försök. Detta ger ett maximalt fel på tidsskalan i storleksordningen ± 6 sekunder. Detta bedömdes ge den lämpligaste tidsskalan. Den tid till uppnådd koncentration som anges i diagrammen i rapporten är därför en uppskattning av den egentliga tiden och läsaren uppmanas att ta hänsyn till detta.

Man bör fundera över vilket tidsperspektiv man ska ha på koncentrationsmätningen. För personskyddets skull är det knappast nödvändigt att mäta längre än en eller möjligtvis ett par minuter, då ett utrymme av detta slag, till exempel ett stridsfordon, bör kunna utrymmas mycket snabbt vid fara. För egendomsskyddets skull kan det dock vara nödvändigt att upprätthålla koncentrationen en längre tid. Vid provning enligt NFPA 2001[3] anges 15 minuter som erforderlig tid för upprätthållande av koncentrationen. Kvarhållandetiden har naturligtvis betydelse för återantändningsskyddet. 15 minuter kan därför anses som ett lämpligt tidsperspektiv för koncentrationsmätningen.

Det har också visat sig omöjligt att kunna uppnå exakt samma fyllnadsgrad i behållaren för samtliga tre släckmedel. Med en låg fyllnadsgrad kommer tryckfallet i behållaren att vara förhållandevis lägre än för en behållare med högre fyllnadsgrad. Detta ger ett jämnare massflöde under utströmningens första del då släckmedlet förekommer som vätska i både behållare och rörsystem, då den huvudsakliga delen av släckmedlet strömmar ut. Det ligger inte innanför detta projekts ramar att undersöka variationen av utströmningsskarakteristika vid olika fyllnadsgrad, men det är viktigt att ha detta som bakgrundsinformation då man studerar experimentella data. Eftersom det rör sig om så små volymer kommer ett system med lägre fyllnadsgrad inte att ta upp signifikant mer plats, eftersom det bara handlar om ett par liter för att sänka fyllnadsgraden avsevärt. Släckmedelsmängden ökar ju dock linjärt med volymen. Om man istället tänker sig att skydda en större volym kan en lägre fyllnadsgrad medföra avsevärt större behållarvolym och även högre kostnader.

3 Normaltemperaturförsök

3.1 Allmänna iakttagelser

De inledande försöken i serien inleddes med test i rumstempererade förhållanden. För detta ändamål placerades försökscontainern inne i lab-hallen i V-huset, LTH. Temperaturen inne i lab-hallen håller sig omkring 20 °C men kan variera någon grad om till exempel portarna ut öppnas för till exempel en leverans. Hallen är dock så stor att den naturliga omblandning som den normala ventilationen ger bör räcka för att hålla temperaturen på en jämn nivå. I rapporten benämns alla försök ifrån denna serie som utförda vid 20 °C, dvs normal inomhustemperatur. Under de försök som involverade provbränder steg temperaturen något över detta, till ca 28 °C. Detta påverkade inte försöken nämnvärt.

Samma utrustning användes genom alla försöken som vid de senare testen i köldkammaren, förutom att förvärmningen av praktiska skäl inte kunde användas vid normaltemperaturförsöken. Detta kunde ha gett isproppar i systemet vid transporten till köldkammaren.

3.2 Resultat från försök

Försöken utfördes i två omgångar. Den första omgången genomfördes utan provbränder för att få en kontroll av den rena koncentrationen och samtidigt en bild av hur koncentrationen fördelade sig i förhållande till den tänkta dimensioneringen. I den andra omgången användes provbränder på olika nivåer i containern, se kap 2.5.4.

3.2.1 Koncentrationsmätningar

De koncentrationsmätningar som gjordes, visade att den dimensionerade koncentrationen uppnåddes i samtliga försök vid 20 °C. Vid golvnivå erhöles i regel en jämn koncentration under hela försöket. Kvarhållandetiden för koncentrationen blir sämre på en högre nivå i rummet, vilket framgår av respektive diagram. (Diagr. 3.1, 3.2 & 3.3) Försökstiden hölls till ca 600 sekunder för försöken vid den här temperaturnivån. Det visade sig också i samtliga fall, att koncentrationerna stämde mycket väl överens för de mätare som var monterade på samma höjd. Därför redovisas här och i följande kapitel endast tre kurvor för koncentrationen trots att totalt fem mätare monterats.

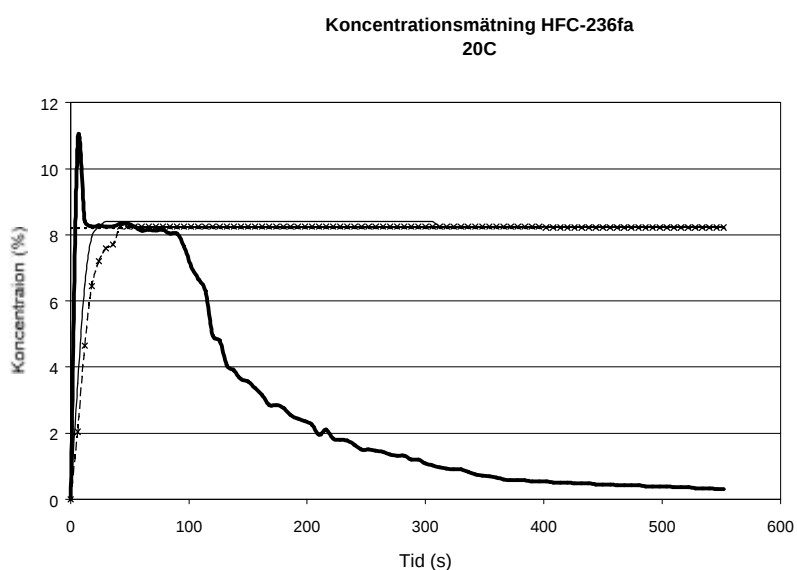


Diagram 3.1

Det framgår av diagram 3.1 att kvarhållandetiden vid dimensionerande koncentration blir cirka 100sekunder för HFC-236fa. Koncentrationen vid Mitt och Golv håller en jämn fördelning genom försöket. Detta visar att försökscontainern hade vissa läckyor, förmodligen som en spalt vid de dubbla dörrar som täckte ena kortsidan. Dessa dörrar var konstruerade med en befintlig gummilist runt hela dörrpartiet. För att något försöka minska läckageytorna förbättrades den befintliga gummilisten med ytterligare tätningslist. Det verkar som om läckageytorna ändå har kvarstått, varför det blir något osäkert att försöka diskutera hur kvarhållandetiden blir, då integriteten på utrymmet inte varit riktigt fullgod. Det kan ändå konstateras att sökt koncentration uppnås.

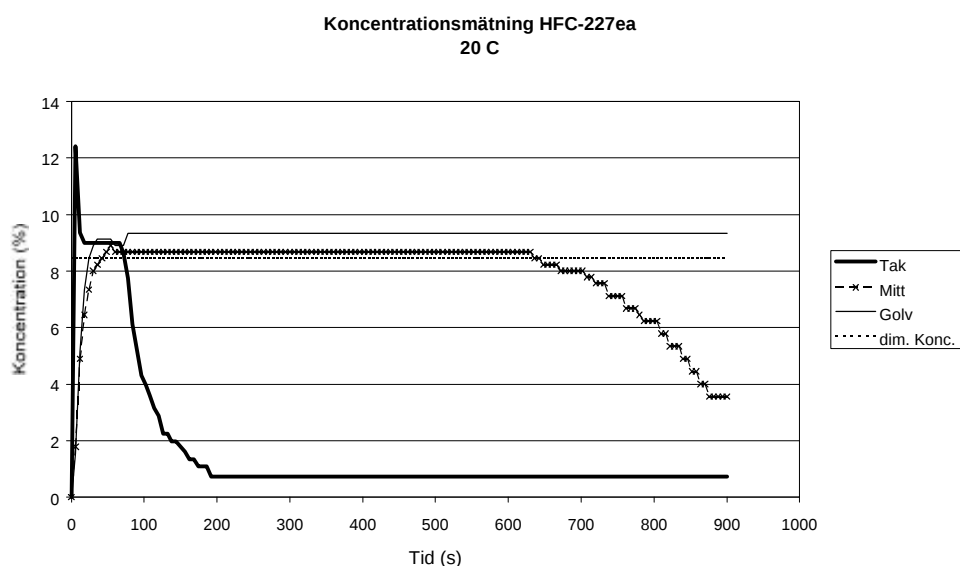


Diagram 3.2

HFC-227ea uppnår sin dimensionerande koncentration och även här sjunker koncentrationen snabbast i takhöjd. På mittnivå erhålls en kvarhållandtid på ca 600 s. Golvnivå håller en jämn koncentration genom försöket.

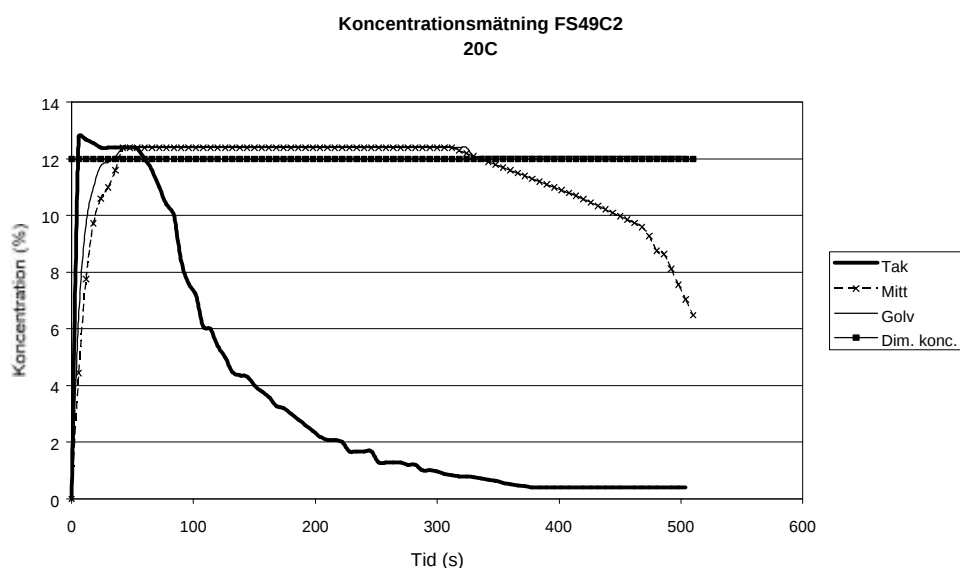


Diagram 3.3

FS49C2 skiljer sig inte nämnvärt ifrån de andra två släckmedlen utan även här erhålls den sökta koncentrationen. Mitt nivå håller sin koncentration till strax efter 300 sekunder för att sedan sjunka sakta. Koncentrationen vid golvnivå ligger jämnt genom försöket.

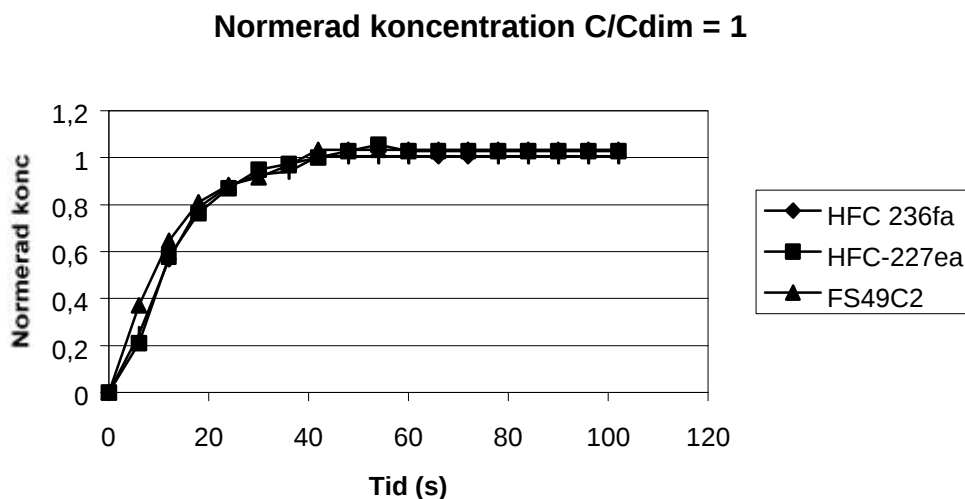


Diagram 3.4

Som en jämförelse har den uppmätta koncentrationen normerats emot den dimensionerade koncentrationen. Diagram 3.4 visar att skillnader i tid till dimensionerande koncentration mellan de olika släckmedlen inte kan påvisas med denna mätmetod. Luftsamplern lämnar endast en mätpunkt var 6:e sekund samtidigt som att den inte startat vid exakt samma tid för de olika försöken. Därför måste slutsatser ifrån detta diagram dras med försiktighet och mer ses som en försiktig jämförelse.

3.2.2 Utströmningstid

Mätningar med Effunc visade att utströmningstiden ligger inom de 10 sekunder som var den dimensionerande gränsen för försöken. Diagram 3.5 visar en jämförelse mellan de olika ingående släckmedlen vid temperaturen 20 °C.

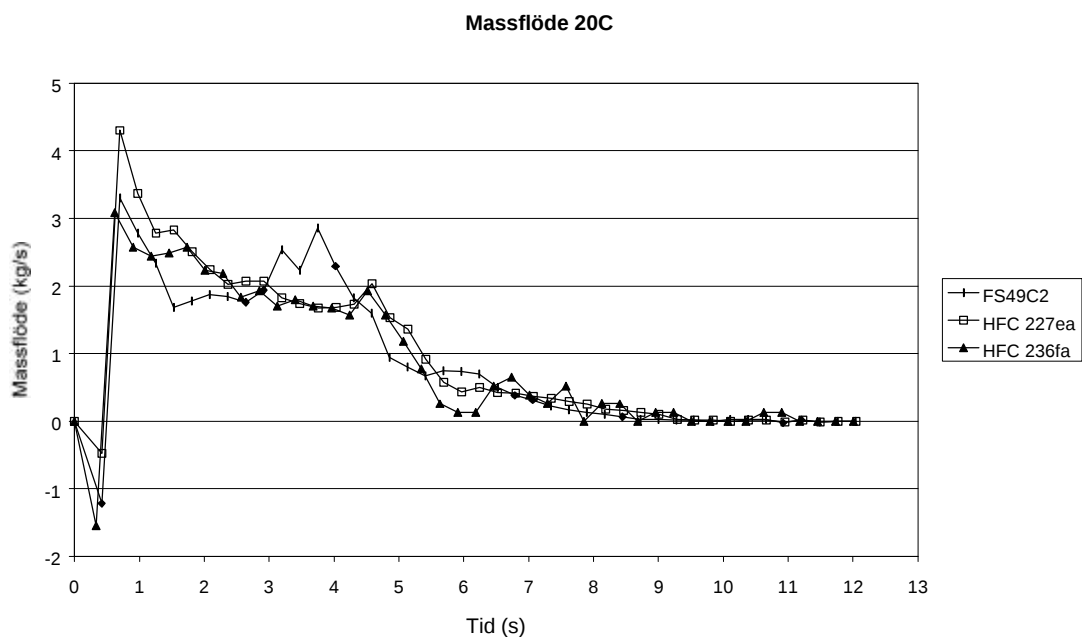


Diagram 3.5

Eftersom massflödet i samtliga fall går mot 0 vid strax efter 9 sekunder får det dimensionerande målet, att utströmningen skall vara avklarad inom 10 sekunder, anses vara uppnått.

Det negativa massflöde som redovisas under den första sekunden av försöket beror troligen av de rörelser som reaktionskrafterna från rörsystemet ger upphov till vid aktivering av systemet.

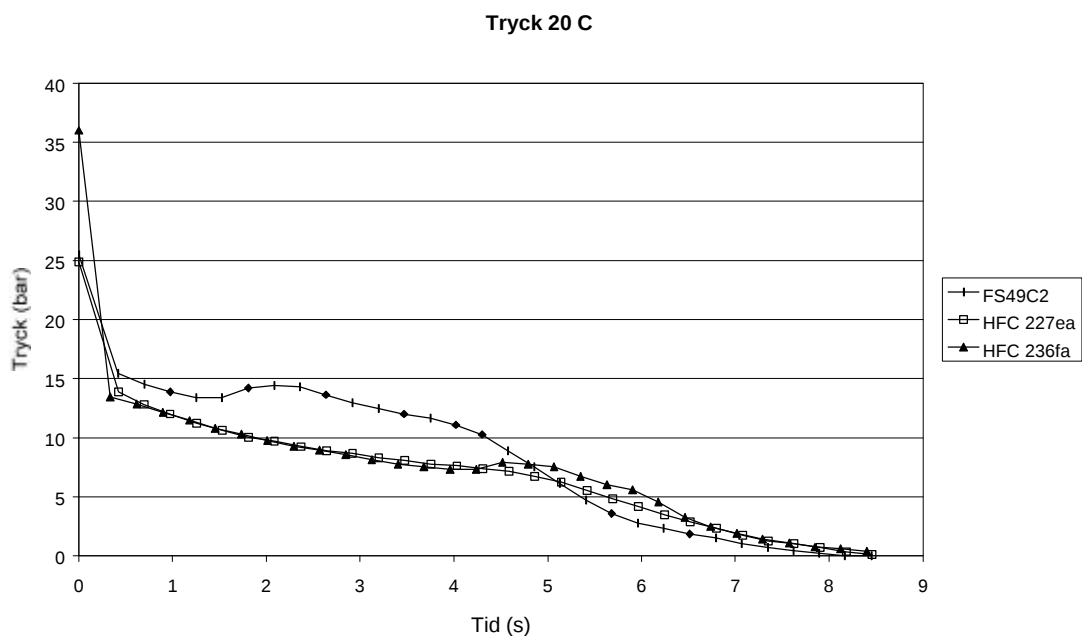


Diagram 3.6

Diagram 3.6 visar en jämförelse över trycket i systemet vid 20 °C.

4 Köldförsök

4.1 Iakttagelser vid försöken

Försöken vid temperaturerna 0, -15 och -30 °C genomfördes vid Försvarets forsknings- och provningsplats, FFK Karlsborg. Där finns en köldkammare som är stor nog för att rymma all försöksutrustning. Under försöken i köldkammaren blev det uppenbart att elektronisk utrustning inte fungerar felfritt i låga temperaturer. Under vissa av försöken gick det inte att få några data från Effunc-apparaturen på grund av att den låga temperaturen gjorde att elektroniken i mätapparaturen inte fungerade. Följaktligen gick en del data förlorade vid lågtemperaturförsöken. Tillräckliga data för att dra väl underbyggda slutsatser erhöles dock.

Vid lägre temperatur stelnade den gummilist som tätade dörren till försöksutrymmet så mycket att det blev omöjligt att stänga dörren. Delar av denna fick därför avlägsnas, vilket bör ha lett till att utrymmet inte var lika tätt som i föregående försök. Detta inträffade dock först vid -30 °C. Detta tycks inte ha haft någon avgörande inverkan på försöken.

4.2 Utströmningstid

Då släckmedlets temperatur sänks under kokpunkten kommer den inte längre att bilda gasbubblor under utströmningen. Det kväve som använts för att trycksätta släckmedelsbehållaren och som delvis löst sig i släckmedlet kommer dock att delvis övergå i gasform och på så vis ändå bilda ett tvåfasflöde. Det är dock troligt att andelen släckmedel i vätskefas kommer att öka vid en temperatursänkning. Trycket i behållaren kommer dock att sjunka med temperaturen, vilket kommer att ge en långsammare utströmning. Denna förutsägelse stöds av *Utvärdering av...* [4], men man kan vänta sig att dessa båda effekter till en del kommer att ta ut varandra.

Under försöken visade det sig dock att utströmningstiden höll sig inom rimliga ramar i samtliga fall, även om trycket i behållarna sjunker vid lägre temperaturer. I samtliga fall var tömningen av behållarna i princip avslutad vid 8 sekunder. Det kan vara intressant att diskutera vad som ligger bakom detta, eftersom flasktrycken vid -30 °C låg ca 10 bar under trycket vid normaltemperatur. Eftersom fastillståndet hos släckmedlet aldrig undersöktes, och hade varit mycket svåra att genomföra under rådande förhållanden, kan inga säkra slutsatser angående detta dras. De videofilmer som gjordes under försöket kan dock ge ett kvalitativt mått på fastillståndet. Det är troligt att vätskefasen dominerade mer och mer ju lägre temperaturen blev, och även videofilmerna av försöken stödjer denna slutsats. Följaktligen blev densiteten på den utströmmande gas/vätskeblandningen högre och högre ju lägre temperaturen blev. Detta kan kompensera för att flasktrycket är lägre, så att en tillfredsställande utströmningstid ändå erhöles.

4.3 Släckmedelsfördelning

I köldförsöken var omgivningstemperaturen i flera fall lägre än kokpunkten för det aktuella släckmedlet. Delar av släckmedlet bör därför ha stannat i vätskefas en ansevärd tid efter utlösning. Under utlösningen fördelades denna emellertid i en aerosol, som åtminstone initialt upprätthöll koncentrationen till avsedda nivåer. Vad gäller kvarhållningstid vid -30°C bör man göra en konservativ bedömning av resultaten, eftersom en del av tätningen avlägsnades (se kap 4.1). Det visade sig också att det tog lite längre tid för att komma upp till de avsedda koncentrationsnivåerna i köldförsöken.

Slutsatsen bör alltså bli att en tillfredsställande koncentration kan uppnås även då släckmedlet används under kokpunkten. Kvarhållningstiden och därmed också återantändningsskyddet blir dock reducerad.

I samtliga försök hade de förvärmade kopparrören en temperatur som översteg det aktuella släckmedlets kokpunkt. Därmed får det anses troligt att inget släckmedel i vätskefas förekom i samplerutrustningen.

4.4 Vätskefasens uppträdande

Då temperaturen på systemet och omgivningen sänks under kokpunkten så kommer släckmedlet att i huvudsak initialt att uppträda i vätskefas. Detta innebär att släckmedlet som lämnar dysan inte förångas lika snabbt som i vanliga fall, men så småningom kommer den ändå att förångas. Man kan jämföra denna aerosol med en motsvarande vattenspray vid 20°C. Resultatet blir att man får en mängd vätskedroppar med en viss storleksfördelning som långsamt förångas, se *Limitations of ...* [11]. Man kan även förvänta sig att vätskedropparna är för stora för att kunna hålla sig svävande, och istället fastnar på ytor i rummet. Den storleksfördelning som erhöles under försöken är helt okänd och skulle krävt ytterligare utrustning för att mäta. I appendix C diskuteras droppstorlekens betydelse för förångningen av släckmedlet.

4.5 Släckförmåga i vätskefas

Då man förutsäger vad som kommer att hända då släckmedlet används under sin kokpunkt kan man ställa sig mycket tveksam till om brandskyddet ens blir i närheten av vad som är tillfredsställande. Dock har det i försöken visat sig att denna temperatursänkning inte haft någon avgörande effekt på släckförmåga eller rumslig fördelning. Eftersom utrustningen i försöket inte alls är avsedd att producera en släckande dimma (små droppar av vätska), utan att snabbt få ut släckmedlet och skapa en turbulens så att denna kan fördelas och förångas, är förhållandena knappast idealiska för släckning med hjälp av vätskedroppar. Hur kommer det sig då att brandskyddet blir tillfredsställande ändå?

4.6 Förångning under utströmning

Försök har genomförts, se *Fluid dynamics of ...* [7], med snabbare utströmningar för bland annat de släckmedel som behandlas här. Även om dessa försök behandlar betydligt snabbare utströmningar kan resultaten ge en fingervisning om hur släckmedlet uppför sig under de förhållanden som rådde under de försök som utfördes i anslutning till denna rapport. I de ovan nämnda försöken mättes dynamiskt tryck och hastighet under utströmning i vanlig rumstemperatur samt under kallare förhållanden, vilket gav ett mått på andelen vätska respektive gas i strömningen. Dessa observationer stöder i hög grad de observationer som gjorts i denna studie, nämligen att andelen vätska initialt är mycket högre, eftersom ingen omedelbar förångning (flashning) inträffar då vätskan inte är överhettad (det vill säga, är kyld under sin kokpunkt), utan den i stor andel innehåller vätska även då sprayen strömmat en bit utanför dysan. Andelen vätska för HFC-236fa och HFC-227ea 1,3 m från dysan är i dessa försök 30% i rumstemperatur. HFC-125 däremot, som är huvudbeståndsdelen i FS49C2, förångas mycket snabbare så att nästan ingen vätska (<5%) finns kvar under motsvarande förhållanden. Dessa skillnader kan hänföras till skillnaden i Jakobs tal (se nedan).

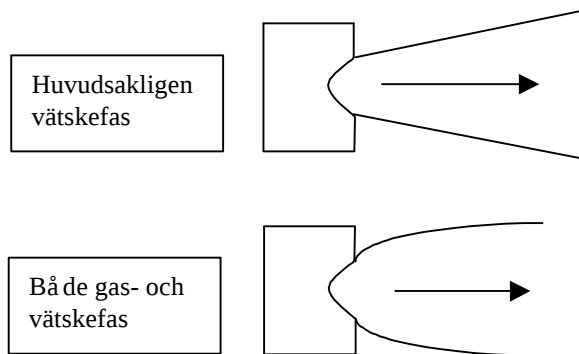


Fig 4.1. Visuell skillnad på utströmningen vid olika temperaturer.

4.7 Vätskedroppars beteende

För att kunna fungera som ett rumsskydd i vätskefas måste vätskedropparna fördelas till alla volymer i rummet, även i komplicerade geometrier. Detta har visat sig mycket svårt att uppnå, se *Limitations of water...* [11]. Fallhastigheten hos vattendroppar avgörs av storleken. Om det system som används i försöket jämförs med ett vattendimmsystem som opererar kring 100 bar eller mer, blir det uppenbart att en så fördelaktig droppstorlek och fördelning i rummet som krävs för ett fullgott rumsskydd troligen inte kommer att uppnås. Droppstorleksfördelningar och fallhastigheter diskuteras bland annat i *Släckmedel...* [8].

Då släckmedlet strömmar ut ur dysan är det, som tidigare nämnts, i vätskefas om temperaturen är lägre än släckmedlets kokpunkt. De vätskedroppar som då når fram till väggen innan de förångas, vilket i detta fall förmodligen kommer att vara en stor del av släckmedlet, kommer att fastna på denna och "våta" den. Så småningom kommer dessa droppar att förångas även om omgivningstemperaturen är under kokpunkten (jämför med vatten vid, säg, 20 °C. Vätskor förångas även under sin kokpunkt, fast betydligt långsammare.) På så vis kommer inte allt släckmedel att falla ner till golvet, utan hamna på olika ytor inuti volymen och där så småningom förångas.

Detta beteende har kunnat dokumenteras i de fall då provbränder har placerats i försöksutrymmet. Vätskedropparna har då absorberat sot ur luften, varefter de efterlämnat märken på väggarna då de förångas.

Vidare har samma beteende kunnat observeras genom att vissa ytor på utsidan av containern under försöken kylts till betydligt lägre temperaturer under betydligt längre perioder än genomsnittet. Detta har kunnat observeras genom frostbildning och beror på att släckmedlet "stjäl" energi från omgivningen för att förångas.

4.8 Adiabatisk förångning och Jakobs tal

Ett mått på hur lätt den aktuella gasen förångas är Jakobs tal, som formuleras enligt

$$(4.1) \quad Ja = \frac{\Delta H}{\Delta h_{fg}} \approx \frac{C_p (T_{start} - T_{kokpunkt})}{\Delta h_{fg}}$$

där ΔH =energiändringen för temperatursänkningen (kJ/kg), C_p = sp. värmekapacitet (kJ/kg K), T_{start} =omgivningstemperatur (K), $T_{kokpunkt}$ =släckmedlets kokpunkt (K) och Δh_{fg} =förångningsvärme (kJ/kg)

Jakobs tal är dimensionslöst och visar hur stor del av det aktuella ämnet, i vårt fall släckmedel, som kan övergå till gasfas med endast den energi som den överhettade vätskan kan lämna ifrån sig genom att sänka sin temperatur till kokpunkten. Att överföra energi till släckmedlet från inblandad luft i aerosolen tar betydligt längre tid och därför bör en stor del

adiabatisk förångning vara positivt för att snabbt kunna få över släckmedlet i gasfas och därmed dessutom genom den snabba expansionen få en god omrörning i utrymmet.

Notera att Jakobs tal endast är giltigt då släckmedlet och omgivningen har en temperatur som överstiger kokpunkten. I annat fall kommer förångningen att gå betydligt långsammare.

På dessa bedömningsgrunder kan man ranka de tre släckmedlen utifrån en teoretisk utgångspunkt, där FS49C2 skulle vara bäst ($Ja=0,52$ för huvudkomponenten HFC-125) och HFC-227ea skulle vara näst bäst ($Ja=0,306$) och HFC-236fa sämst ($Ja=0,165$). Som jämförelse har halon 1301 ($Ja=0,509$). Samtliga värden hämtas från *Fluid dynamics...* [7].

De koncentrationsmätningar som genomfördes visade dock inte de skillnader som väntas. En anledning kan vara att Jakobs tal framför allt har en betydelse då man betraktar explosionsundertryckningssystem och liknande, som har en aktiveringstid på mindre än en sekund, medan de 8-10 sekunder som behandlas här ger tillräckligt med tid för att en viss värmetransport ska kunna ske. En annan anledning till varför skillnaderna inte uppmäts är att mätutrustningen inte är tillräckligt noggrann för att kunna se skillnaderna, eftersom tidsintervallet är 6 sekunder på koncentrationsmätaren.

I appendix B har en noggrannare översyn av ångtrycket gjorts för de släckmedel som har kokpunkter över lägsta temperaturen i försöket.

4.9 Slutsatser angående släckmedelsfördelningen

Den föregående diskussionen visar på att brandskyddet blir bättre än förväntat troligen på grund av att släckmedel i vätskefas avsätts på ytor i försöksvolymen. Det är dock viktigt att påpeka att detta inte har kunnat bekräftas direkt, bland annat på grund av att sikten i försöksutrymmet omedelbart blir praktiskt taget noll då systemet utlöses, vilket medför att ovan nämnda förlopp inte har kunnat fångas på videoupptagningar. Det finns därför alltså inga säkra bevis för att det förhåller sig enligt ovan förda resonemang, men man kan i alla fall hålla det för troligt eftersom det måste finnas någon förklaring till hur släckmedelsfördelningen blir tillfredsställande trots att vätskefasen dominerar.

En liten del av släckmedlet kan också förekomma som tillräckligt små droppar för att kunna följa med luftströmmarna och upprätthålla koncentrationen, men detta är förmodligen en obetydlig mängd, särskilt om man tänker på hur liten del av den totala massan släckmedel dessa små droppar omfattar. Dessa droppar håller sig då svävande i luften tills de antingen stöter ihop med en större droppe och faller ned, eller tills den förångats.

För att säkerställa ovan förda resonemang krävs att man mäter droppstorleksfördelningen då systemet utlöses vid den aktuella temperaturen. Detta kan vara något att undersöka i fortsatta försök.

Man skulle också kunna tänka sig att man för att skapa en bättre omrörning och fördelning konstruerade ett system som var specifikt anpassat för kyla, till exempel med fler fast mindre dysor. Under den muntliga kontakt med leverantörer som ingick i projektet, visade det sig att ingen tillverkare hade ett sådant system. Exakt hur ett sådant kan konstrueras kan förmodligen endast fastställas genom applikationsspecifika experiment.

4.10 Släckmedelskoncentrationens temperaturberoende

Vid dimensioneringen av släckmedelsmängden beslutades att samtliga släckmedelsmängder skulle bestämmas vid 20 °C. Detta har två fördelar, nämligen att man inte låser sig vid vilken släckmedelsbehållare som skall användas vid en specifik temperatur, vilket är praktiskt om något av försöken skulle gå fel, samt för att visa att man vid dimensionering måste ta hänsyn till vid vilken temperatur systemet kan tänkas användas.

I gengäld måste man för att få en rättvisande bild av släckmedlet beräkna en förväntad koncentration vid respektive koncentration, vilken sedan kan jämföras med de resultat som erhöles. Genom att räkna med allmänna gaslagen kan följande förhållande bestämmas:

$$(4.2) \quad \frac{V_{släckmedel}}{V_{släckmedel} + V_{luft}} = \frac{n_{släckmedel}}{n_{släckmedel} + n_{luft}} = \frac{C}{100}$$

För att beräkna antalet mol släckmedel i volymen används den dimensionerande koncentrationen vid 20 °C. Denna mängd släckmedel antas giltig för samtliga temperaturer. Detta innebär att man antar att den mängd släckmedel som initialt läcker ut genom tryckavlastning är densamma oavsett vid vilken temperatur som släckmedlet används. I verkligheten kan denna mängd variera något beroende på fastillstånd hos släckmedel, utlösningstid etc. Särskilt viktigt är det att påpeka att man bör undvika att konstruera systemet så att inget släckmedel i vätskefas kan läcka ut genom avlastningsöppningar, eftersom detta kan leda till en mycket större förlust av släckmedel än vad man dimensionerat för. När detta antagande är gjort kan man med ideala gaslagen beräkna de förväntade släckmedelsmängderna i samtliga fall:

$$(4.3) \quad V_{släckmedel} = \frac{C}{100} \times V_{total} \Leftrightarrow V_{luft} = V_{total} - V_{släckmedel} \Rightarrow n_{luft} = \frac{p \times (V_{total} - V_{släckmedel})}{R \times T}$$

(Samtliga storheter i SI-enheter, trycket, P, som normalt lufttryck och temperaturen, T, som den aktuella temperaturen vid försöket.)

Genom dessa ekvationer kan alltså antalet mol luft och släckmedel beräknas och enligt ekvation 4.2 kan dessa användas för att beräkna den förväntade koncentrationen. Denna beräkningsmetod tar dock inte hänsyn till att släckmedlet kan vara ojämnt fördelat i rummet. I princip så gäller den också bara den initiala koncentrationen eftersom utrymmet inte var helt tätt och släckmedlet därför så småningom ventilerades ut.

Den allmänna gaslagen är endast giltig då det aktuella ämnet befinner sig i gasfas. Eftersom testerna i vissa fall utfördes vid temperaturer då släckmedlet övervägande bör ha uppträtt som vätska, är den inte giltig för samtliga fall. I de fall då släckmedlet användes under kokpunkten kan man dock anta att antalet mol släckmedel är lika många som då det användes över kokpunkten. Eftersom släckmedlet har en densitet några hundra gånger högre i vätskefas, kan man då istället anta att den upptog en försumbar volym, eller med andra ord att hela volymen upptogs av luft, uppblandad med släckmedel i vätskefas (droppar). Detta stöds av att övertrycket tycktes vara mycket litet då systemet utlöstes i dessa fall. Genom förda resonemang kan man räkna med att hela volymen är fylld av luft vid den aktuella temperaturen, eller med andra ord att släckmedlet initialt upptar en försumbar volym. På så vis kan man komma runt problemet och ändå beräkna den förväntade koncentrationen, eftersom de droppar som sögs in i kopparrören omedelbart förångades och allmänna gaslagen då kan antas vara giltig för den luft/släckmedelsblandning som sögs in i luftsamplern. Följaktligen kan en förväntad koncentration beräknas i samtliga fall trots att den inte är applicerbar på aerosol. Man skulle även kunna föra ett analogt resonemang genom att istället för att räkna med volymprocent istället presentera koncentrationen i g/m³. Det spelar då ingen roll vilken fas släckmedlet befinner sig i. De förväntade koncentrationerna blir enligt tabellen nedan:

Temperatur (°C)	C HFC-236fa (%)	C HFC-227ea (%)	C FS49C2 (%)
20	8,2	8,5	12,0
0	7,6	7,9	11,2
-15	6,7	7,4	10,6
-30	6,4	6,6	10,0

Maximal teoretisk koncentration vid de olika försökstemperaturerna. Tabell 4.1

Det är ur tabellen uppenbart att säkerhetsmarginalerna mot cupburnervärdet krymper rejält när man sänker temperaturen. Därför är det, som tidigare påpekats, viktigt att tänka på vid vilken temperatur som släckmedlet kan tänkas användas då systemet dimensioneras. Detta är också uppenbart när man betraktar diagrammen över koncentrationsmätningen i appendix A. Dessa mätningar stämmer väl överens med ovan förda resonemang.

4.11 Släckförmåga

Som nämns i 4.3 uppnåddes tillfredställande koncentrationer i samtliga försök. Detta medförde också att samtliga släckförsök var lyckade, även om det tog längre tid att uppnå erforderliga koncentrationer vid lägre temperaturer. Vid samtliga försök användes en förbrinntid på minst 60 sekunder. På videofilmerna av försöket är det uppenbart att släckningen inte sker förrän utströmningen i det närmaste är avslutad, vilket leder till slutsatsen att koncentrationen varit korrekt dimensionerad. En lägre koncentration hade kanske medfört att släckningen inte varit tillfredsställande.

Anledningen till att släckförmågan blir så bra, även vid temperaturer långt under kokpunkten för släckmedlet, är förmodligen att den aerosol som bildas fungerar utmärkt för släckning. Under försöken placerades en provbrand under ett stänkskydd som omöjliggjorde att flamman exponerades direkt för det utströmmande släckmedlet. Även denna provbrand släcktes vid alla tillfällen, vilket måste innebära att dropparna antingen följde med luftströmmen in bakom skyddet i tillräckligt stor mängd för att släcka flamman, eller att den förångades på de heta ytor som omger branden. Oavsett vilken anledningen var kan slutsatsen dras att släckmedlen ger en bra släckning även vid lägre temperaturer.

4.12 Siktbarhet

Då släcksystemet utlöses kyla försöksutrymmet ned, vilket medför att luften inte längre kan innehålla lika mycket vattenånga. Detta resulterar i att en dimma bildas, vilket leder till att det omöjligt att se längre än ett par decimeter inuti försöksutrymmet. Detta är naturligtvis inte alls fördelaktigt för tex en stridsvagnsbesättning som måste utrymma vagnen så fort som möjligt.

4.13 Resultat från försök vid 0 °C

De inledande försöken i köldkammaren genomfördes vid 0 °C. En behållare av varje släckmedel användes vid denna försöksomgång. Inga brandförsök genomfördes. Vid försöken har en del av mätdata gått förlorad vid en mätserie. Detta innebär att tryck- och flödesmätningarna för HFC-227ea saknas. I övrigt genomfördes försöken utan anmärkning.

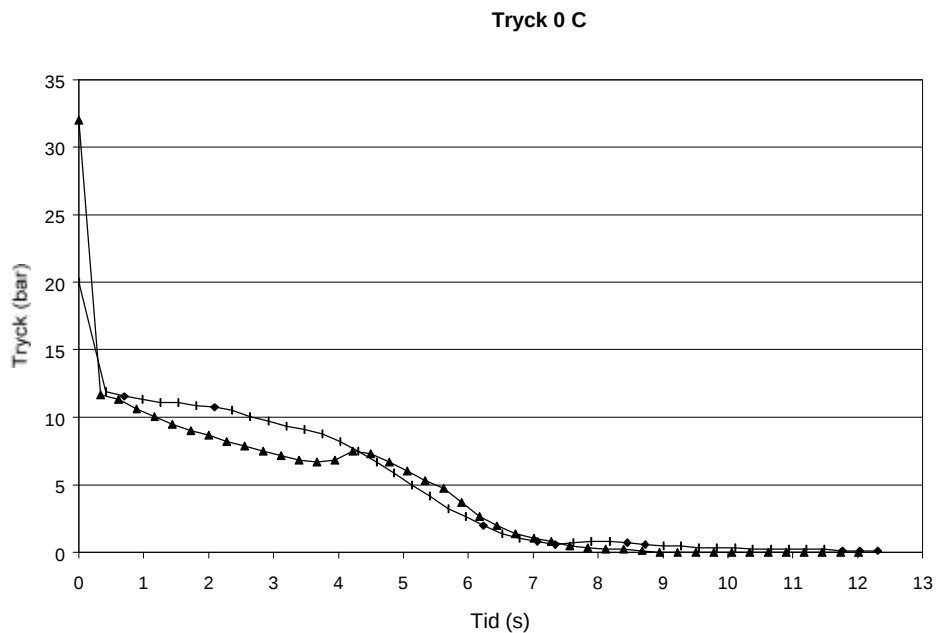


Diagram 4.1

Diagram 4.1 visar tryckkurvans utseende för FS49C2 och HFC-236fa. Det statiska starttrycket i behållaren för HFC-236fa uppmättes innan försöket med precisionsmanometer till 32 bar.

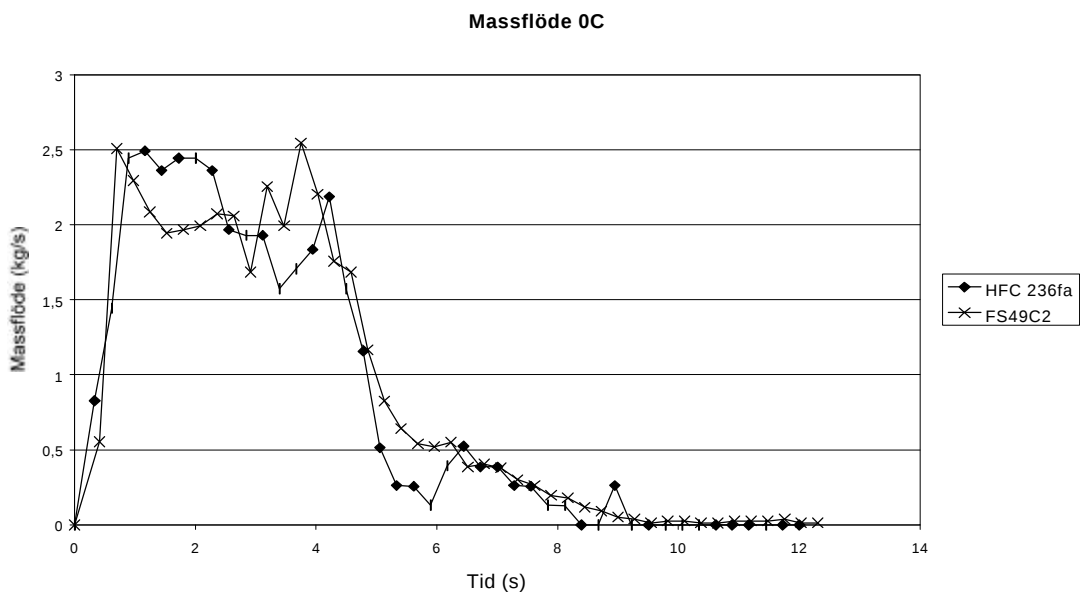


Diagram 4.2

Diagram 4.2 visar kurvorna för massflödet vid 0 °C.

4.13.1 Koncentrationsmätningar

I de diagram som i detta avsnitt redovisar koncentrationen av släckmedel i rummet har den dimensionerande koncentrationen för varje släckmedel bytts ut mot den teoretiskt maximala koncentration, ”Teor. konc” som diskuteras i 4.10. Detta har gjorts för att visa den nivå som kan uppnås om hänsyn till temperaturvariationer tas vid dimensionering. Denna mer rättvisande teoretiska koncentration vid varje temperatur redovisas i tabell 4.1.

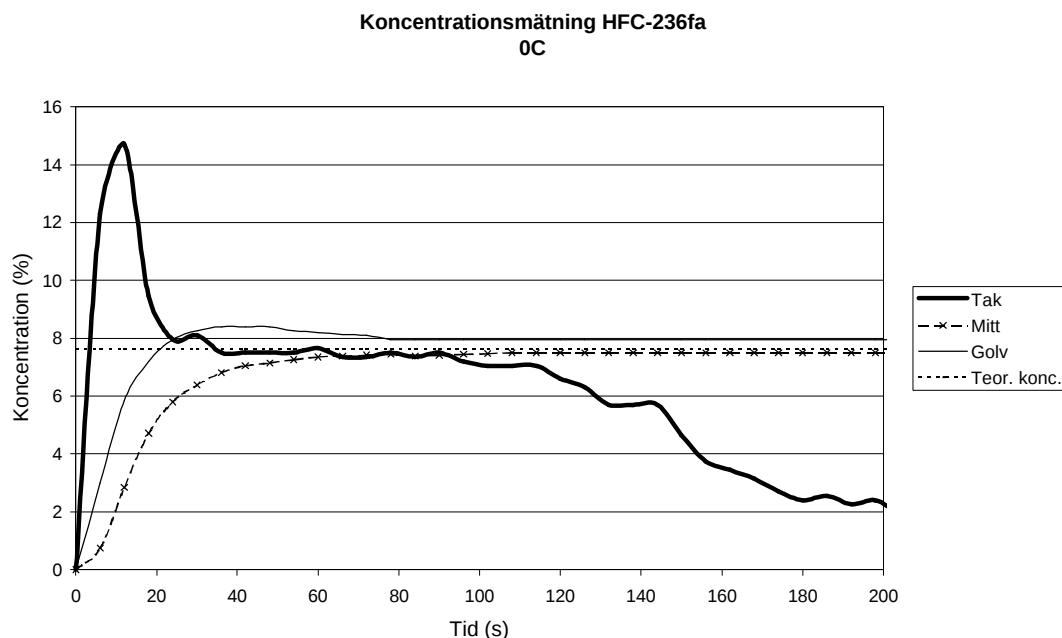


Diagram 4.3

Diagram 4.3 visar koncentrationen under de inledande 200 sekunderna av försöket med HFC 236fa. I appendix A redovisar diagram A.2.4 hela förloppet. HFC 236fa har en kokpunkt på $-1,4^{\circ}\text{C}$ vilket ligger väldigt nära den temperaturgräns där släckmedlet får svårt att förångas. Den dimensionerande koncentrationen uppnås inte, men ett bättre jämförelsemått på hur hög koncentrationen kan bli är den teoretiskt högsta koncentration som redovisas i tabell 4.1. För HFC 236fa blir denna koncentration 7,6 %. Denna koncentration uppnås vid olika tid i olika delar av rummet. Den höga toppen i början av mätningen i takhöjd beror sannolikt på att den vätskespray som kommer ur dysan har träffat i närheten av eller direkt på mätpunkten. I mätpunkten mitt i rummet uppnås som högst 7,5 % och det efter 100 sekunder. Detta kan bero av det faktum att en del av släckmedlet inte förångas ögonblickligen utan fastnar på väggytor för att sedan förångas. Eventuella vätskedroppar faller nedåt under sin förångningsprocess, vilket skulle kunna förklara varför mätningen vid golvnivå uppnår en stabil koncentration tidigare.

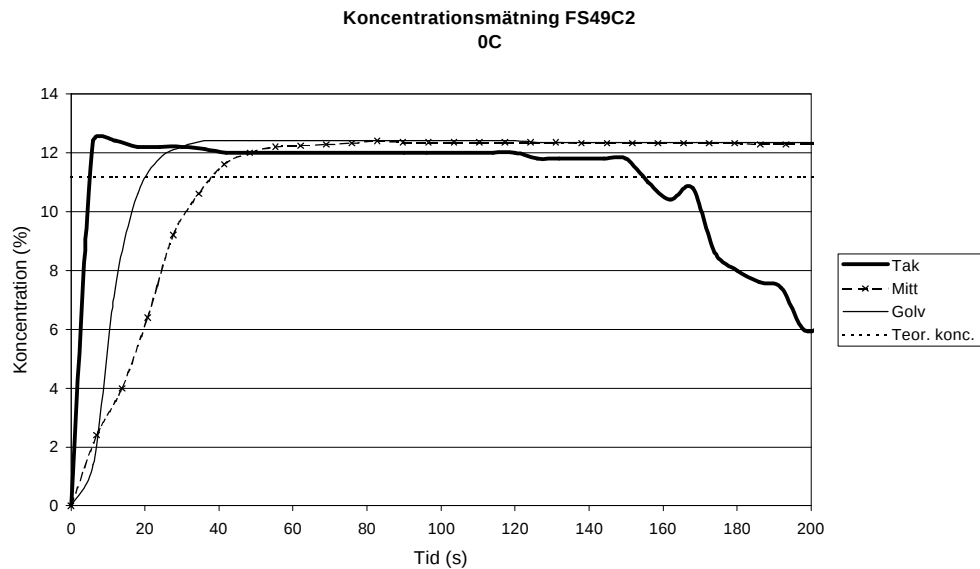


Diagram 4.4 visar koncentrationskurvan för försöket I appendix A redovisar diagram A.2.5 hela förloppet. Detta släckmedel maximala koncentrationen vid den här temperaturen blir 11,2 %, vilket uppnås redan vid 40 som ett mätfel eller att den aktuella behållaren var fylld med något mer släckmedel än som

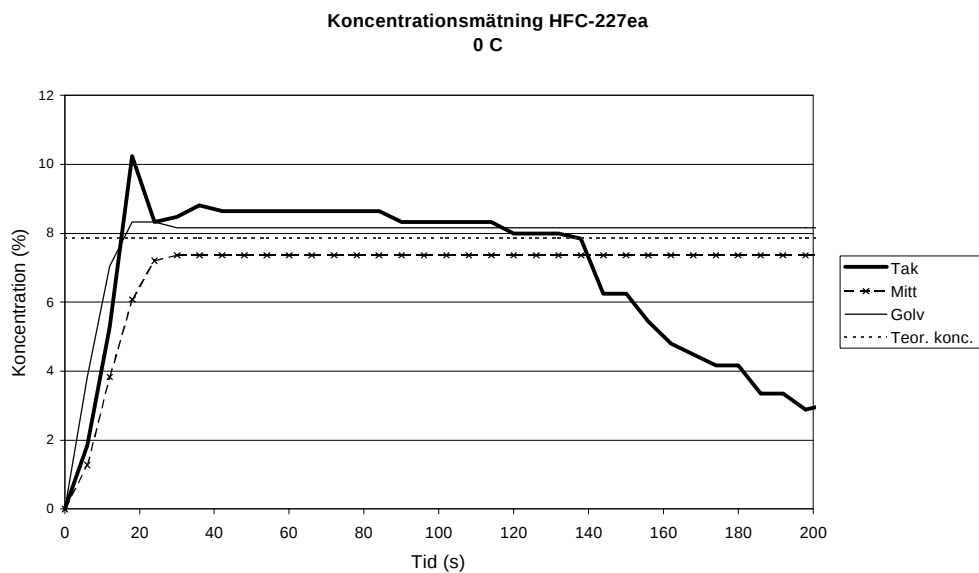


Diagram 4.5

de inledande 200 sekunderna av med HFC-227ea vid den aktuella temperaturen. A.2.6 hela förloppet. vid 0 °C. Denna uppnås vid ca 40 sekunder för hela rummet. Även här uppnås högre värden i

4.14 Resultat från försök vid -15 °C

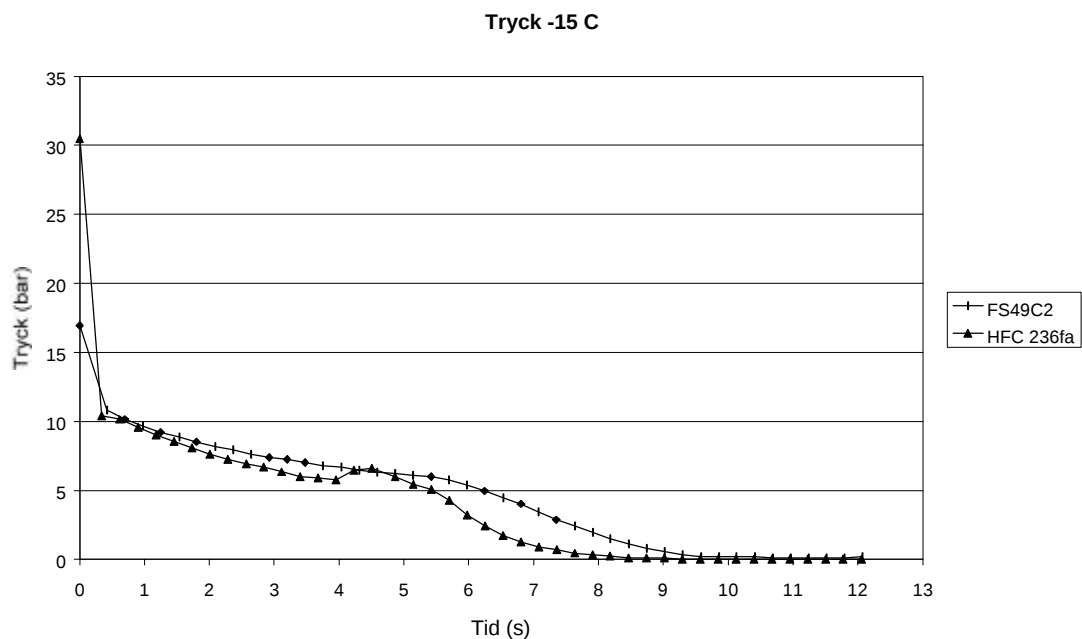


Diagram 4.6

Diagram 4.6 visar tryckkurvan för försöken vid -15 °C. Data saknas pga mätfel för tryckmätning av HFC227ea. Det statiska trycket i behållaren för HFC-236fa uppmättes innan försöket med precisionsmanometer till 30,5 bar.

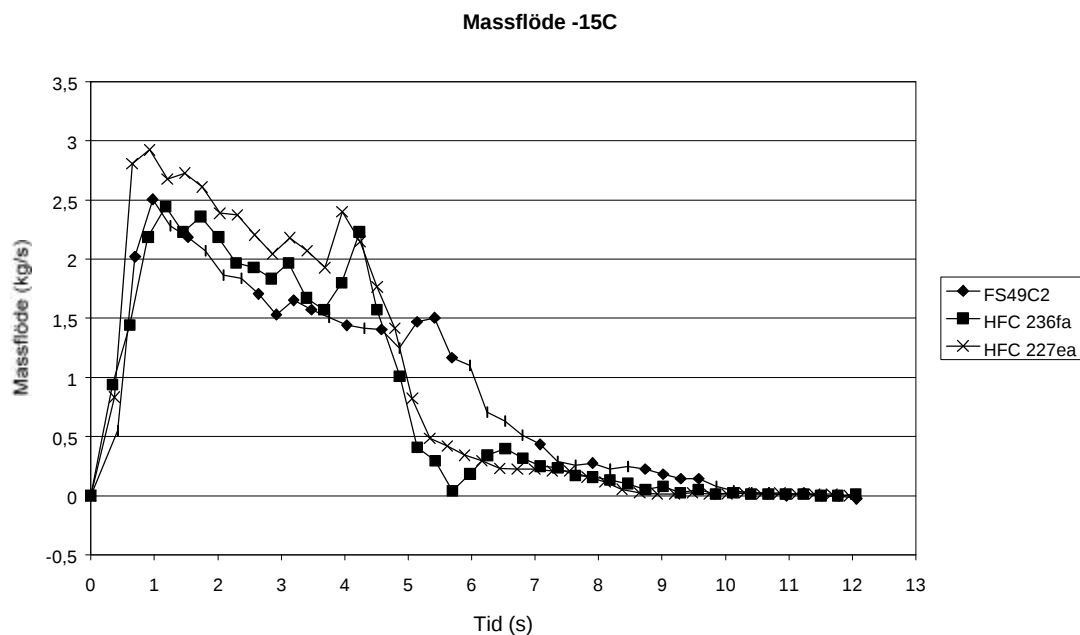


Diagram 4.7

Diagram 4.7 redovisar massflödet för de ingående släckmedlen, från försöken vid -15 °C.

4.14.1 Koncentrationsmätningar

I de diagram som i detta avsnitt redovisar koncentrationen av släckmedel i rummet har den dimensionerande koncentrationen för varje släckmedel bytts ut mot en teoretiskt maximal koncentration, ”Teor. konc”. Detta har gjorts för att visa den nivå som kan uppnås om hänsyn till temperaturvariationer tas vid dimensionering. Denna mer rättvisande teoretiska koncentration vid varje temperatur redovisas i tabell 4.1

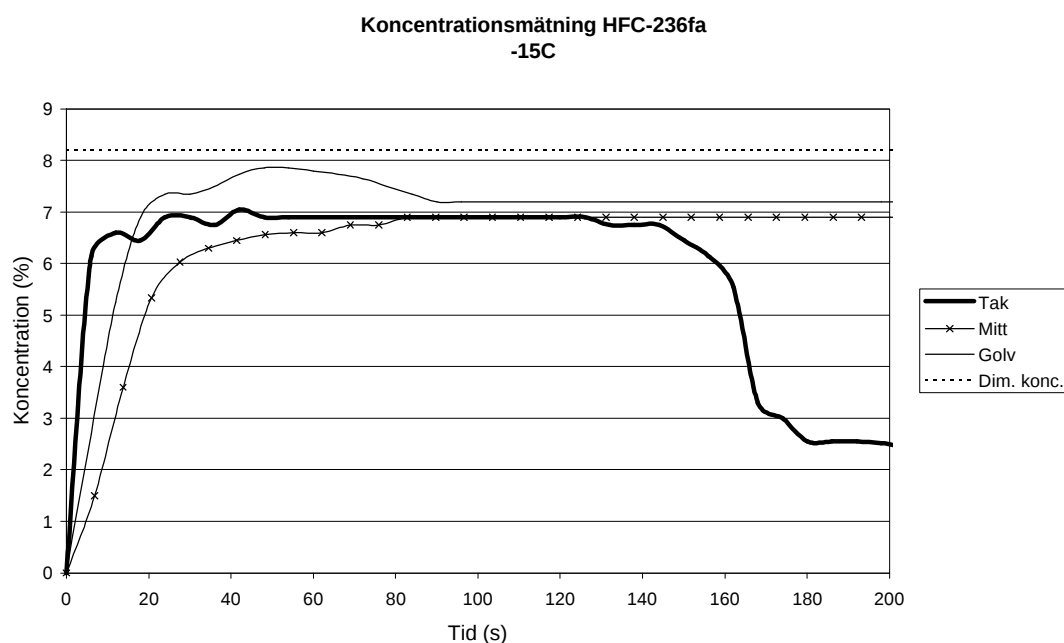


Diagram 4.8

Diagram 4.8 visar koncentrationen för de inledande 200 sekunderna av försöket med HFC-236fa vid -15 °C. Hela förloppet redovisas som diagram A.2.7 i appendix A. Detta släckmedel har en kokpunkt på -1,4 °C vilket kan förklara den lite ostadiga kurvan.

Koncentrationsmätningarna hamnar en bit under den dimensionerande koncentrationen på 8,2 %. Mätningarna vid golvnivå visar att koncentrationen där når ett högsta värde som sedan planar ut till en något lägre nivå. Detta kan tydas som att en del droppar faller ner till golvnivå för att avdunsta där. Den teoretiskt högsta koncentrationen vid denna temperatur uppges i tabell 4.1 till 6,7 %. Denna koncentration uppnås i hela rummet vid ca 80 sekunder.

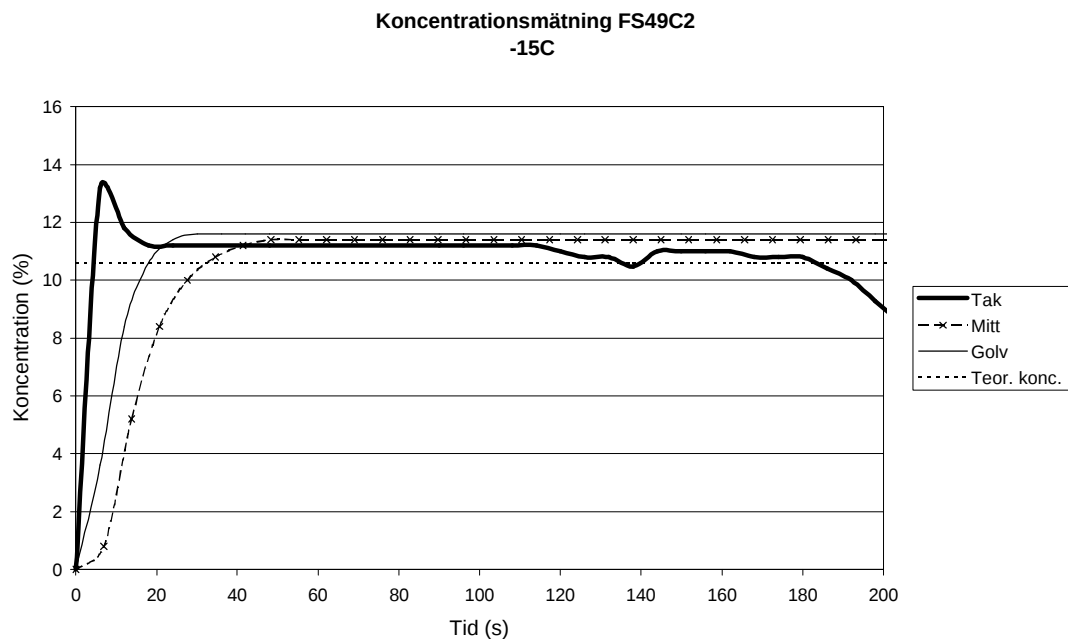


Diagram 4.9

Diagram 4.9 visar koncentrationen under de inledande 200 sekunderna av försöket med FS49C2. Hela förloppet redovisas som diagram A.2.9 i appendix A. Den teoretiskt högsta koncentration som anges i tabell 4.1, 10,6 %, uppnås i hela rummet vid ca 30 sekunder.

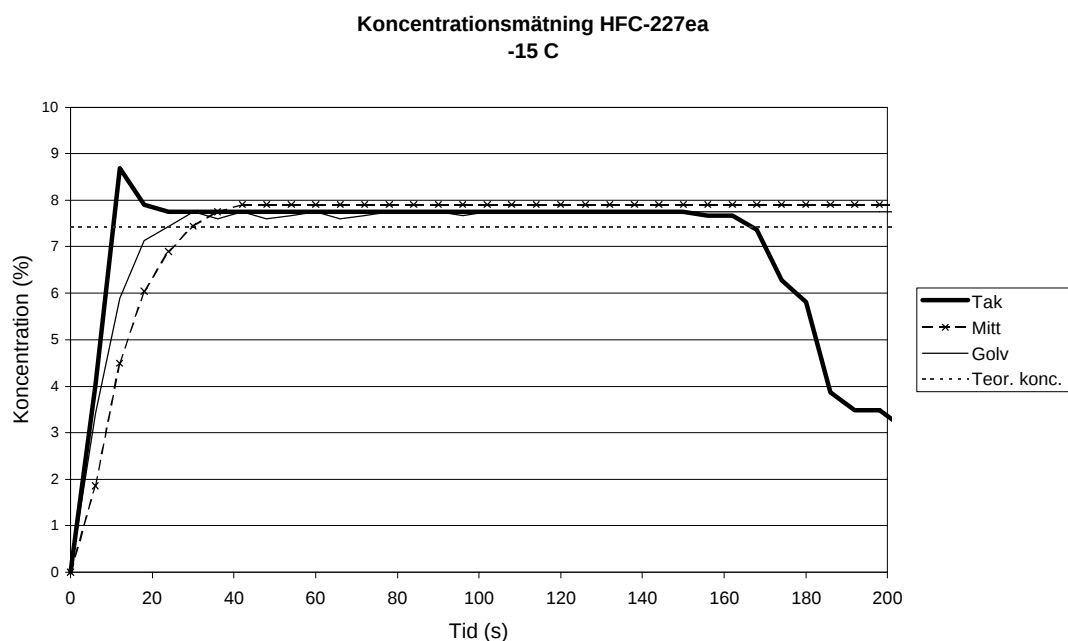


Diagram 4.10

Diagram 4.10 visar koncentrationen under de inledande 200 sekunderna av försöket med HFC 227ea. Hela förloppet redovisas som diagram A.2.8 i appendix A. Tabell 4.1 uppger en högsta teoretisk koncentration till 7,4 %. Denna koncentration uppnås i hela rummet vid ca 35 sekunder. Släckmedlets kokpunkt ligger på -16,4 °C.

4.15 Resultat från försök vid -30 °C

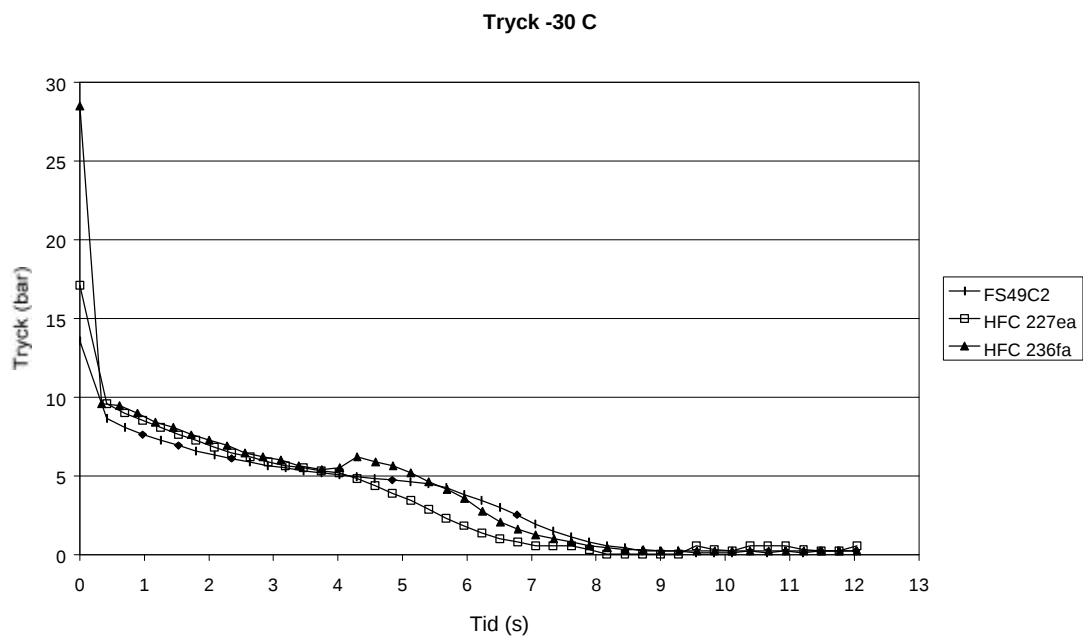


Diagram 4.11

Diagram 4.11 visar tryckkurvan för de ingående släckmedlen vid -30 °C. Det statiska trycket i behållaren med HFC-236fa uppmättes med precisionsmanometer innan försöket till 28,5 bar.

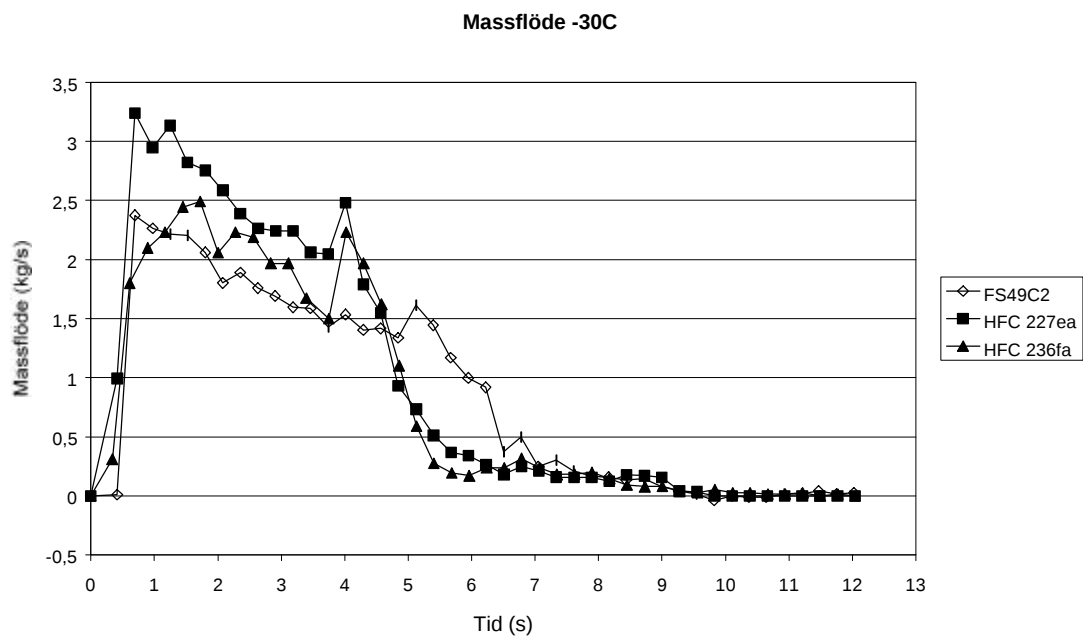


Diagram 4.12

Diagram 4.12 visar kurvan för massflöde vid -30 °C. Även vid detta försök uppnåddes en tömningstid på 10 sekunder för alla släckmedlen.

4.15.1 Koncentrationsmätningar

I de diagram som i detta avsnitt redovisar koncentrationen av släckmedel i rummet har den dimensionerande koncentrationen för varje släckmedel bytts ut mot en teoretiskt maximal koncentration, "Teor. konc". Detta har gjorts för att visa den nivå som kan uppnås om hänsyn till temperaturvariationer tas vid dimensionering. Denna mer rättvisande teoretiska koncentration vid varje temperatur redovisas i tabell 4.1.

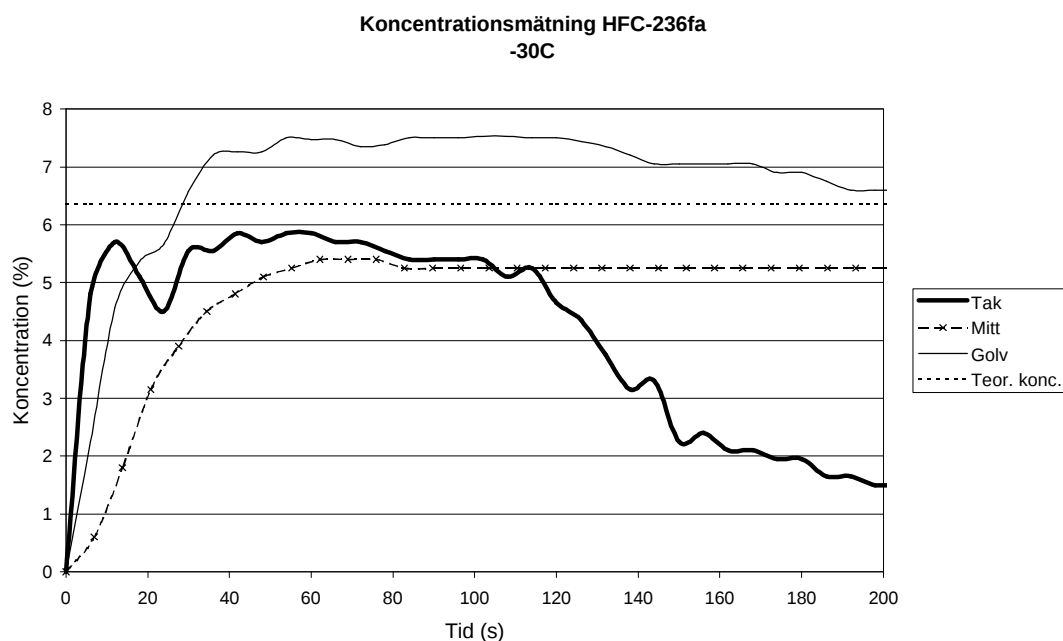


Diagram 4.13

Diagram 4.13 visar koncentrationen under de inledande 200 sekunderna av försöket med HFC-236fa vid $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hela förloppet redovisas som diagram A.2.10 i appendix A. HFC-236fa har en kokpunkt på $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vilket har passerats med god marginal vid försöket. Den teoretiskt högsta koncentrationen beräknas i tabell 4.1 till 6,4 %, vilket inte uppnås i hela rummet under någon del av försöket. Koncentrationskurvan i diagram 4.14 uppvisar en ganska ojämn fördelning av släckmedlet i rummet, med stora variationer mellan olika höjdnivåer. Det bildas en fin aerosol av släckmedlet som fördelar sig i rummet med dessa variationer som följd. Koncentrationen blir markant högst vid golvnivå vilket tyder på att släckmedel i droppform faller nedåt i försöksutrymmet. Uppförandet hos en aerosol och en gas skiljer sig åt just ur denna fördelningssynpunkt.

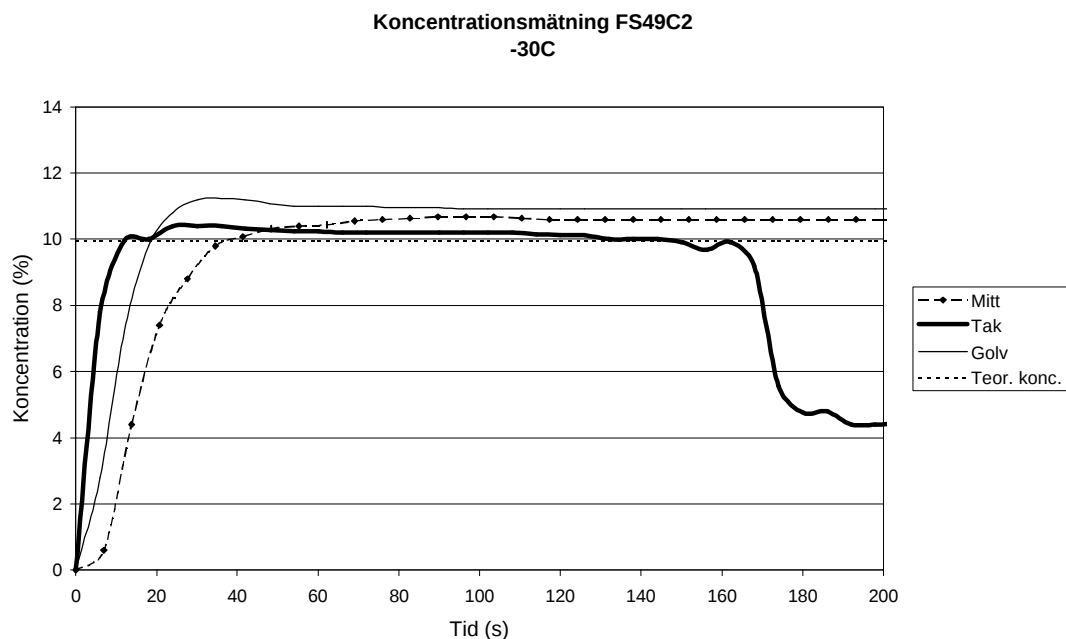


Diagram 4.14

Diagram 4.14 visar de inledande 200 sekunderna av försöket med FS49C2 vid -30°C . Hela förloppet redovisas som diagram A.2.12 i appendix A. Tabell 4.1 anger högsta teoretiska koncentration vid aktuell temperatur till 10 %, vilket uppnås i hela rummet vid ca 40 sekunder.

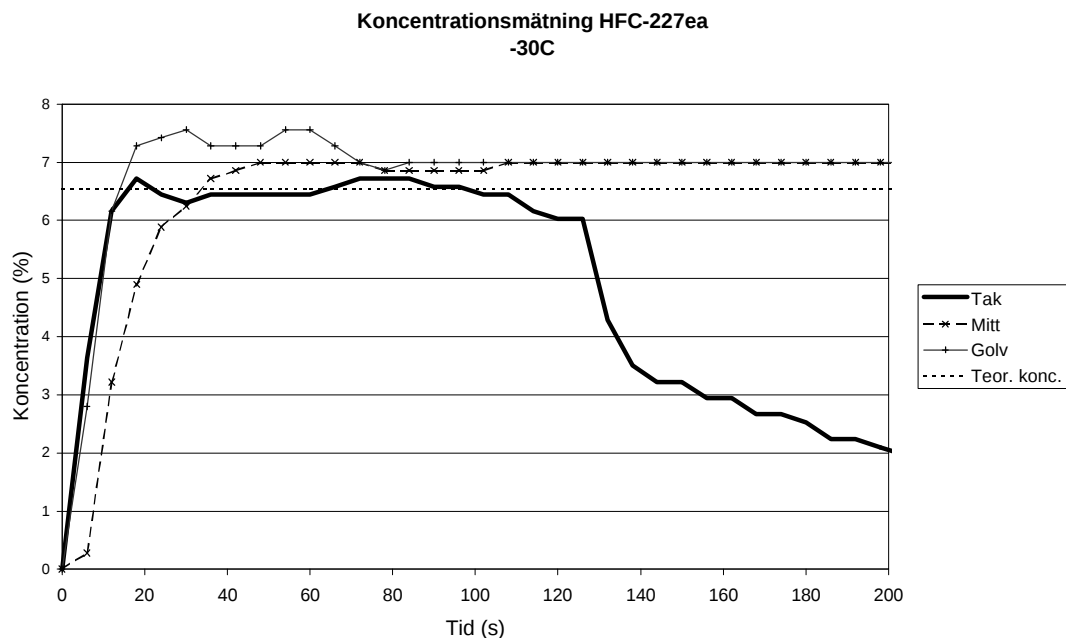


Diagram 4.15

Diagram 4.15 visar de inledande 200 sekunderna av försöket med HFC-227ea vid -30°C . Hela förloppet redovisas som diagram A.2.11 i appendix A. Den högsta teoretiska koncentrationen anges i tabell 4.1 till 6,6 %. Denna koncentration uppnås i rummet vid ca 40 sekunder. HFC-227ea har en kokpunkt på $-16,4^{\circ}\text{C}$ vilket har passerats i detta försök.

5 Diskussion och slutsatser

5.1 Slutsatser angående släckmedlens uppförande i låga temperaturer.

I de tidigare delarna av denna rapport (kap. 4.) ställs ett antal teorier upp för vad som händer då släckmedlen utlöses. Syftet är här att summera och utvidga detta resonemang.

Från koncentrationsmätningarna är det i flera fall uppenbart att koncentrationen med god marginal överskrider den dimensionerade i taknivå under en längre tidsperiod (dvs inte i en enda punkt utan i flera följande punkter). Detta pekar på att släckmedlet i dessa fall förekommer åtminstone till en del som vätska. Som tidigare nämnts är detta underbyggt i försök [7]. Då släckmedlen och omgivningen kyls ned blir detta beteende mer uppenbart. Det tar också längre tid att uppnå den förväntade koncentrationen i köldförsöken, medan själva utströmningen av släckmedlet i samtliga fall håller sig inom de normala kraven (<10 sekunder till tömning). Släckmedlet strömmar således ut ur behållaren på ungefär samma tid oavsett temperatur, men tar längre tid att detektera i köldförsöken.

Slutsatsen måste därför bli att släckmedlet mellan den tid som det strömmat ut och den tid som det detekteras befinner sig i vätskefas, troligen främst på golv och väggar. Detta stöds också av att det i köldförsöken genomgående tar längre tid att uppnå en god koncentration i mätaren "mitt". Det kan då förklaras med att denna mätare är placerad en betydligt längre bit från ytorna (väggar, golv, tak) än vad de övriga mätarna är.

Vidare kan man observera att differensen mellan temperaturmätarna blir större i köldförsöken efter att utlösning skett. Att termoelementen inte registrerar samma temperatur måste bero på att turbulensen är sämre, så att en ordentlig omblandning av utrymmet inte uppstår. Detta stöds också av att släckmedelskoncentrationen inte jämnar ut sig förrän efter en betydligt längre tid än i rumstemperaturförsöken. En sämre turbulens trots i princip samma massflöde tyder också på att en mycket mindre del av vätskan flashar när den lämnar munstycket, eftersom det till stor del är denna plötsliga expansion som skapar turbulensen.

I samtliga fall utom ett uppnås dock den förväntade koncentrationen, med reservation för eventuella mätfel. Således kan man säga att samma effekt som vid 20 °C uppnås, fast efter en viss tidsförskjutning. I vissa fall är inte heller koncentrationen så stabil som man kan önska. Släckning uppnåddes i samtliga fall, men man bör ändå ifrågasätta inträngningsförmågan i komplicerade utrymmen. Vad som kan prövas i framtida försök är att placera en täckt brand längre upp i rummet och fri från väggarna. Förmodligen hade även en sådan provbrand slocknat, fast betydligt senare i detta fall.

Bedömningen utifrån försöksdata måste därför bli att det går att använda dessa släckmedel under sina respektive kokpunkter, men att man i så fall måste ta hänsyn till detta vid en jämförelse med skyddsmålen. En av de stora fördelarna med denna typ av system är ju att en släckande koncentration kan uppnås snabbt jämfört med andra alternativ. Då temperaturen sjunker försvinner alltså förmågan att uppnå en släckande koncentration så snabbt, vilket leder till att denna typ av system kanske inte kan motiveras vid en prisjämförelse etc. Det finns, såvitt den undersökta litteraturen visar, inga metoder att kompensera för köldeffekter på släcksystemen (förutom att en större mängd släckmedel erfordras för att uppnå samma koncentration vid lägre temperaturer). Man skulle möjligen kunna tänka sig att man kompenserade med hjälp av fler dysor eller någon typ av förvärmningssystem då släckmedlet passerar genom rörsystemet.

5.2 Slutsatser och riktlinjer för dimensionering

Det kan vara fördelaktigt att formulera slutsatserna till några klara, enkla riktlinjer för de fall då man dimensionerar ett släcksystem av denna typ som förväntas kunna fungera även i sträng kyla. Här nedan formuleras därför några sådana riktlinjer i punktform

- Då temperaturen sänks, måste detta kompenseras med en större mängd släckmedel. Detta är redan dokumenterat i [3] och det tycks därför redan finnas en medvetenhet för detta problem.

- Penetrationen i komplicerade utrymmen blir långsammare, men uppnås förmodligen. Detta innebär att man, eftersom man inte kan veta var branden uppstår, inte kan räkna med en släckning i samma tidsintervall som vid rumstemperatur. Ur försöken kan man dra slutsatsen att den extra tiden kan sättas till 40-50 sekunder om man vill vara på den säkra sidan.
- Det är lämpligt att, för att minimera kylans effekter på släckmedlet, använda ett släckmedel med så låg kokpunkt som möjligt. I största möjliga mån ska man undvika att använda ett släckmedel under sin kokpunkt för att undkomma de oönskade effekterna av kylan.
- Eventuellt kan ett specialsystem konstrueras för att motverka dessa effekter.

Referenser:

- [1] DiNenno, Beyler, Custer, Walton, Watts, Drysdale, Hall, (Eds.), *SFPE Handbook of fire protection engineering*, 1995, Society of fire protection engineers
- [2] Teknisk information från DuPont, tillgänglig på www.dupont.com
- [3] *NFPA 2001* Standard on clean agent fire extinguishing systems, 2000, National fire protection association, Quincy, MA
- [4] Adolfsson., Schelander, Halonersättningsmedel, *Utvärdering av fysikaliska egenskaper samt förslag till parametrar för konstruktion och beräkning av släcksystem*, Lunds tekniska högskola, 1994, Lunds tekniska högskola, Lund
- [5] Teknisk norm NFPA 12A
- [6] Sören Isaksson, Margareta Simonsson, Göran Holmstedt, *Gasformiga alternativ till halon som släckmedel*. Brandforsk projekt 629-961. SP Rapport 1997:10 Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut ,ISBN 91-7848-668-8, ISSN 0284-5172 Borås 1997
- [7] Pitts, Yang, Gmurczyk, Cooper, Grosshandler, Cleveland, Presser. *Fluid dynamics of agent discharge*, NIST SP861, 1994, National institute of standards and technology. Kan hämtas på <http://fire.nist.gov>
- [8] Göran Holmstedt, Kursmaterial släckmedel och släckverkan, Brandteknik Lunds Tekniska Högskola 1999
- [9] Experimentella data från försök med HFC-227ea, kan hämtas från www.fm200.com/Bib/Halon/NMERI92.htm.
- [10] Thermodynamic properties of HFC-236fa, kan hämtas från www.dupont.com/suva/na/usa/literature/thermoprop/index.html
- [11] Holmstedt, Andersson, *Limitations of water mist as a total flooding agent*, Journal of fire protection engineering, 1997, Society of fire protection engineers.

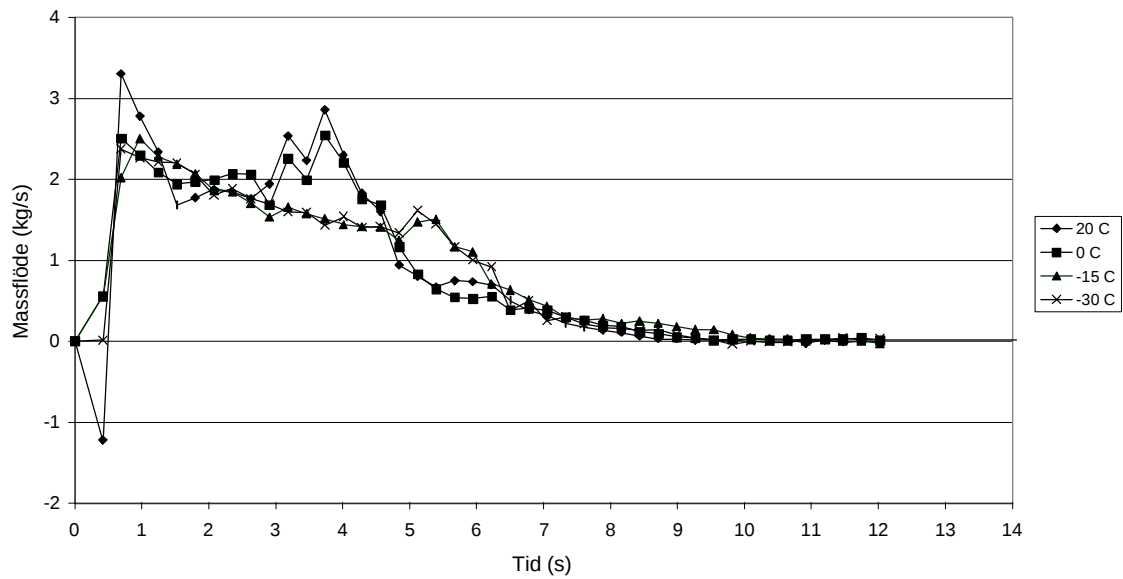
Appendix A

Utdata från försök

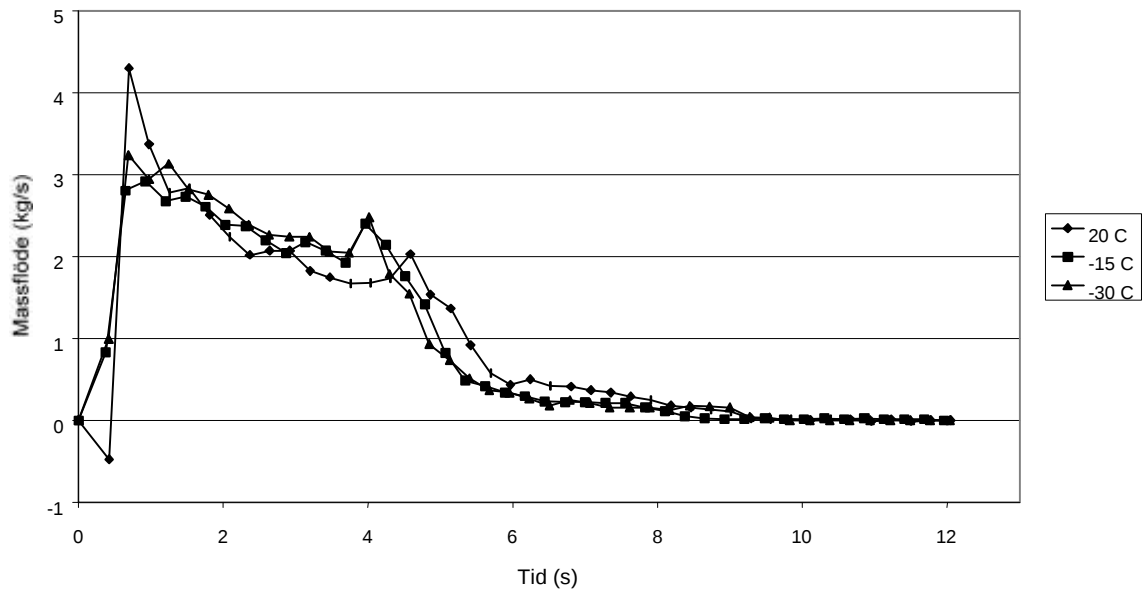
Massflöden för respektive släckmedel vid olika temperaturer.

Notera att massflödet initialt kan vara negativt, vilket beror på en felaktig belastning på lastcellen. Det är tydligt att tömningstiden på systemet är tillfredsställande i samtliga fall.

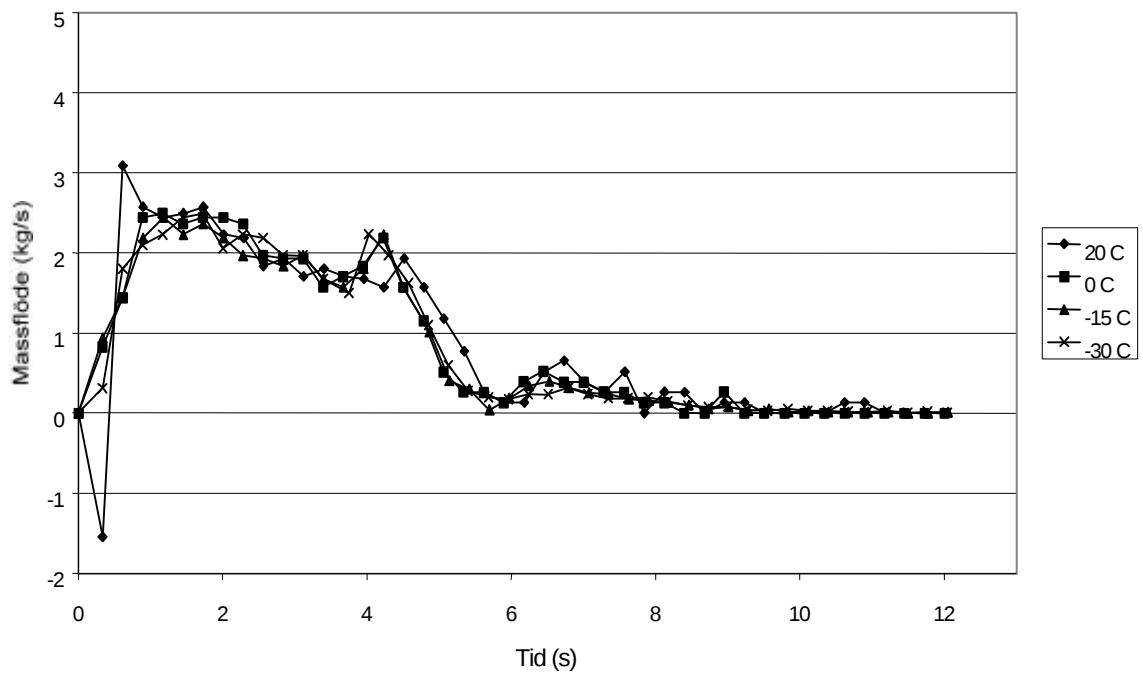
A.1.1
Massflöde FS49C2



A.1.2
Massflöde HFC-227ea

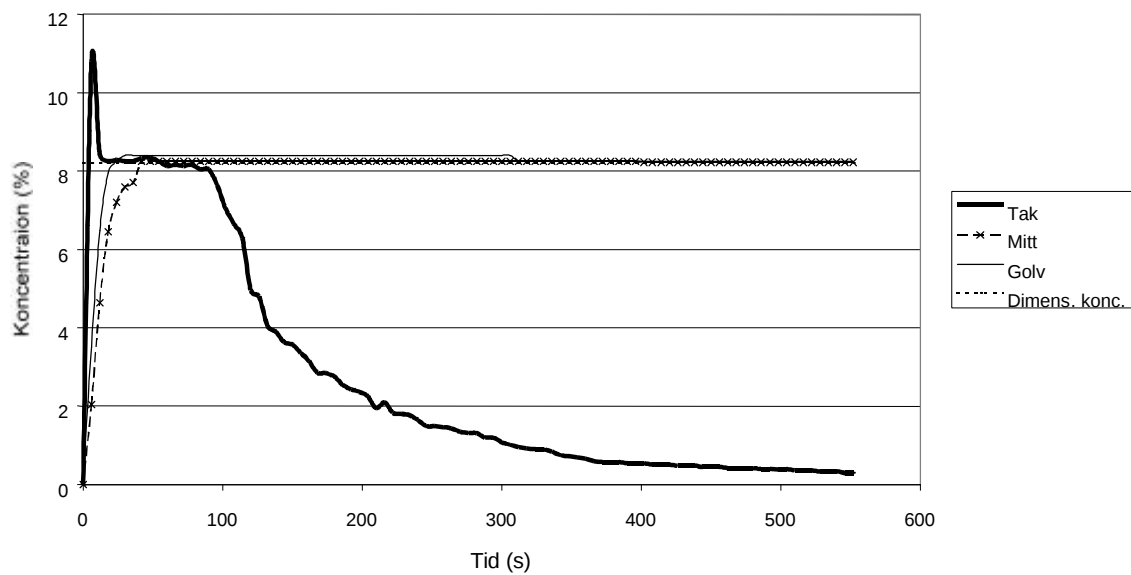


A.1.3
Massflöde HFC-236fa

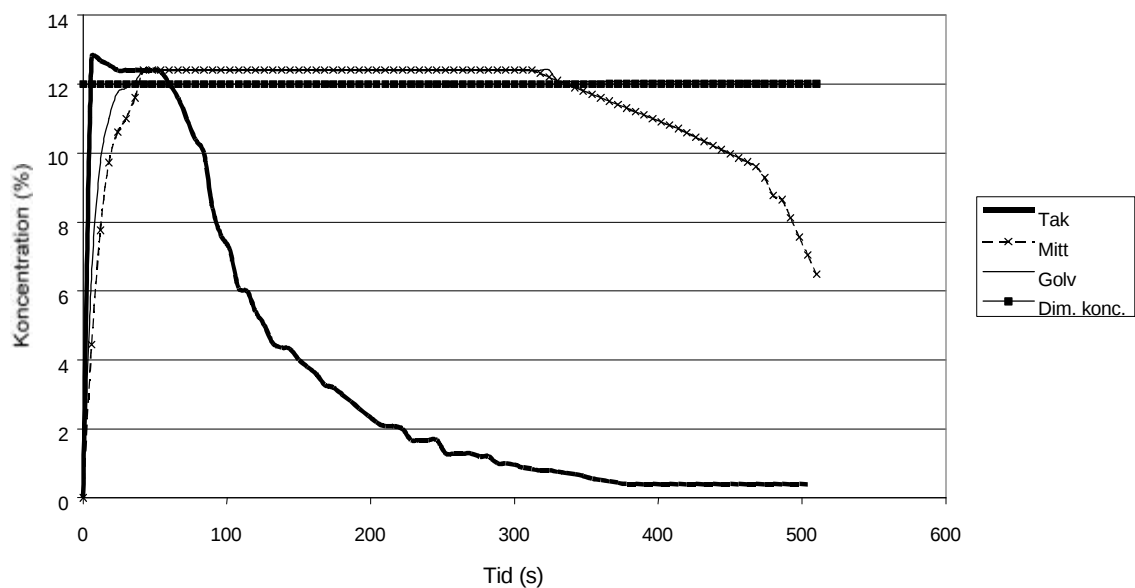


Koncentrationsmätningar för respektive släckmedel vid de olika försökstemperaturerna.

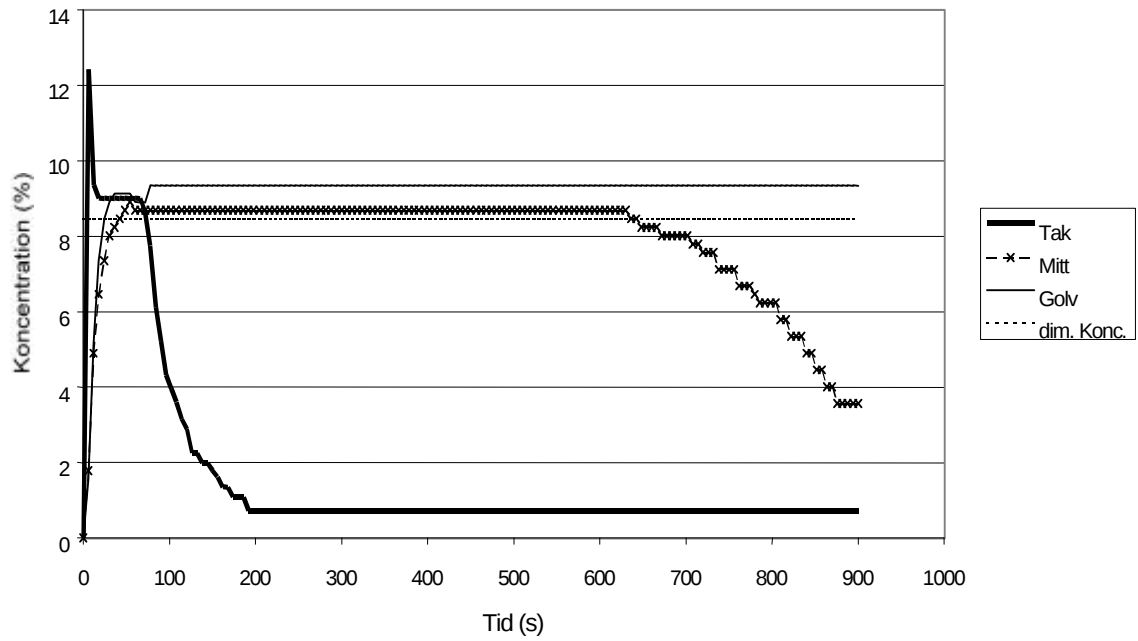
A.2.1
Koncentrationsmätning HFC-236fa
20C



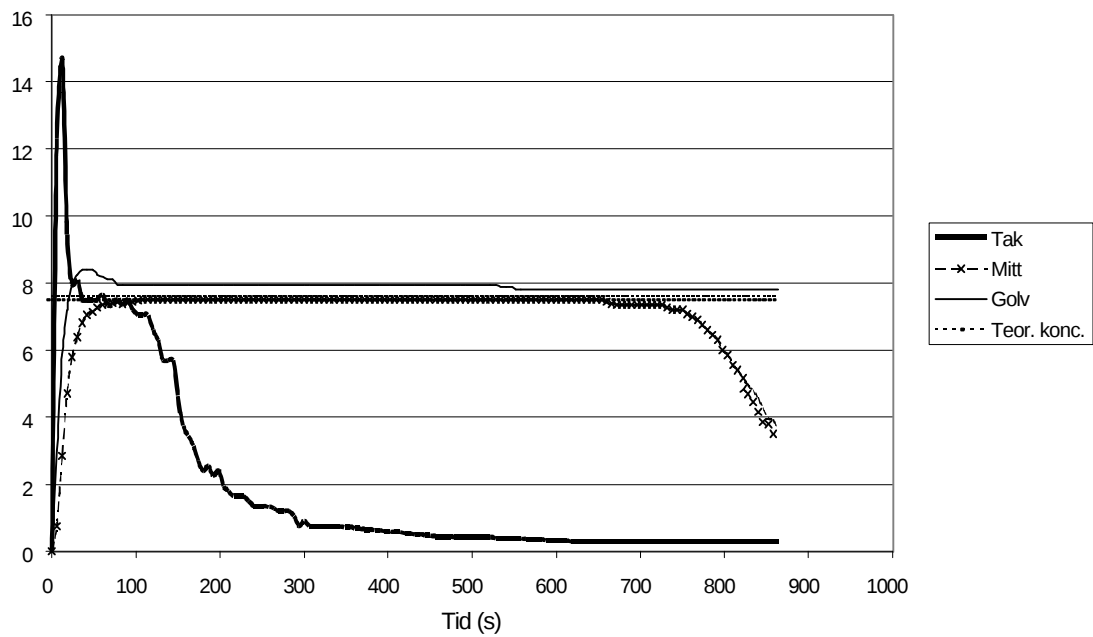
A.2.2
Koncentrationsmätning FS49C2
20C



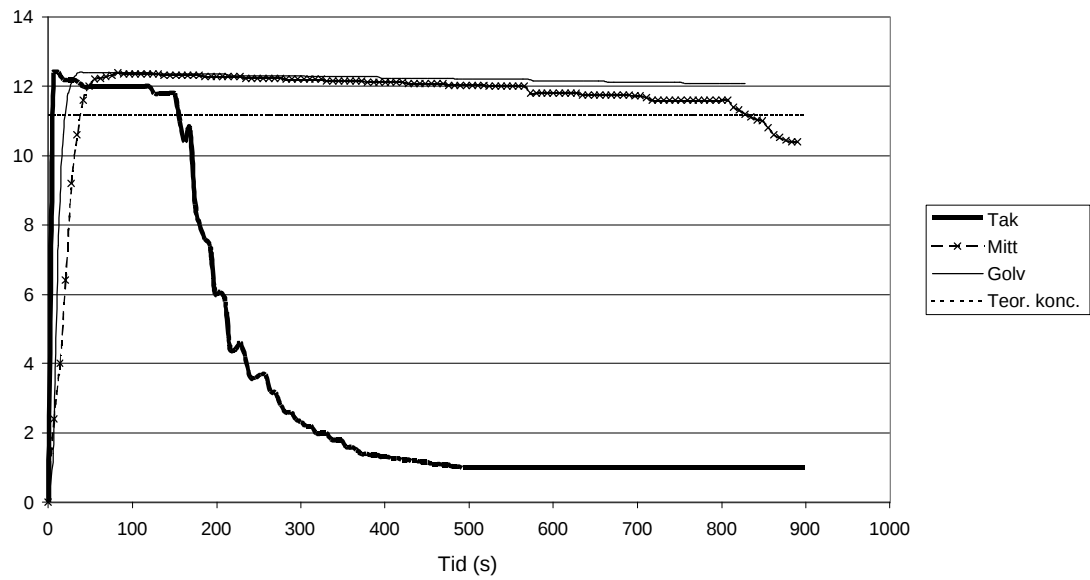
A.2.3
Koncentrationsmätning HFC-227ea
20 C



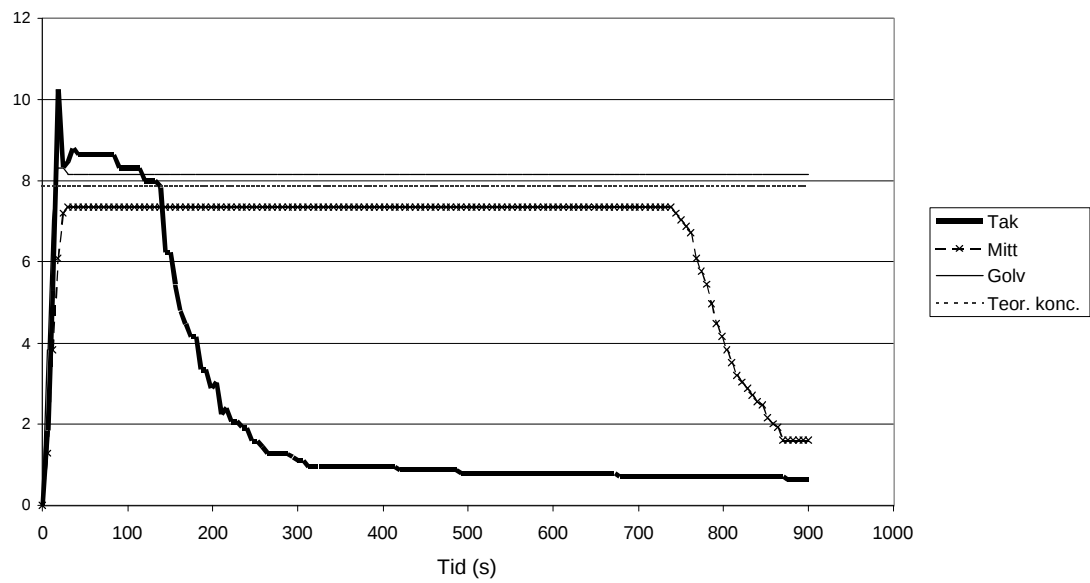
A.2.4
Koncentrationsmätning HFC-236fa
0C



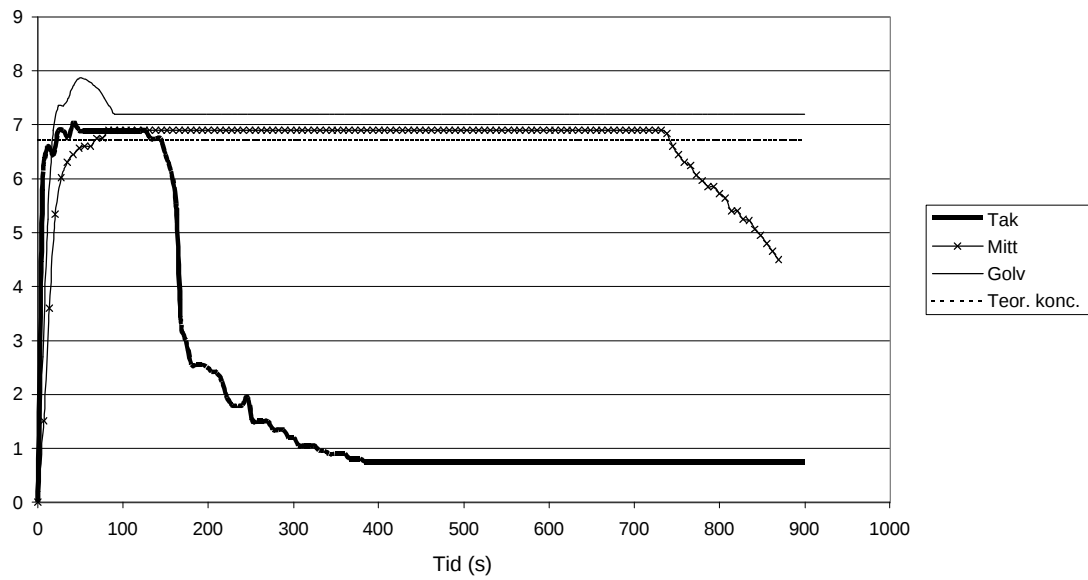
A.2.5
Koncentrationsmätning FS49C2
0C



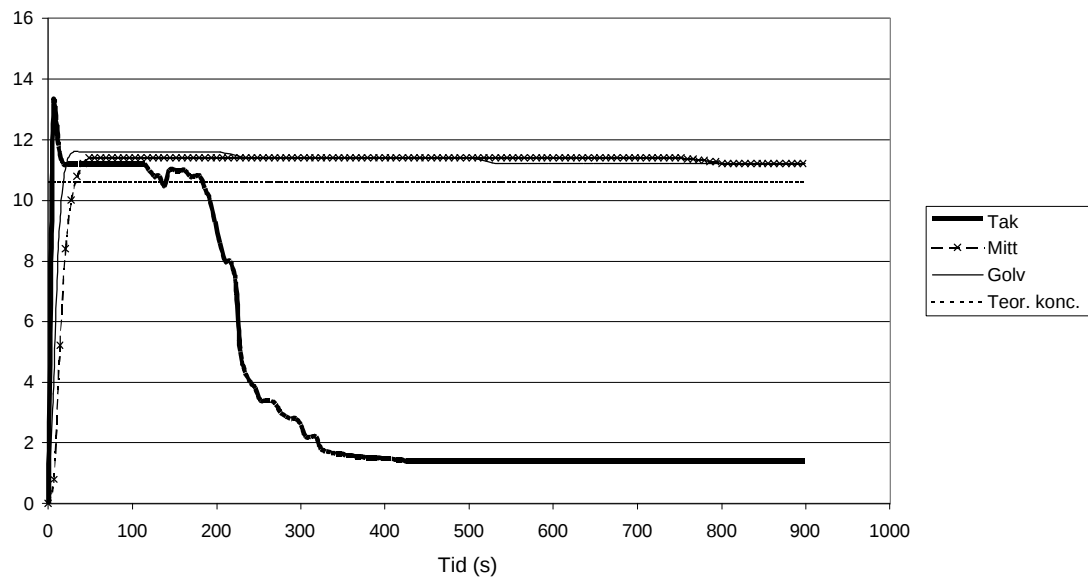
A.2.6
Koncentrationsmätning HFC-227ea
0 C



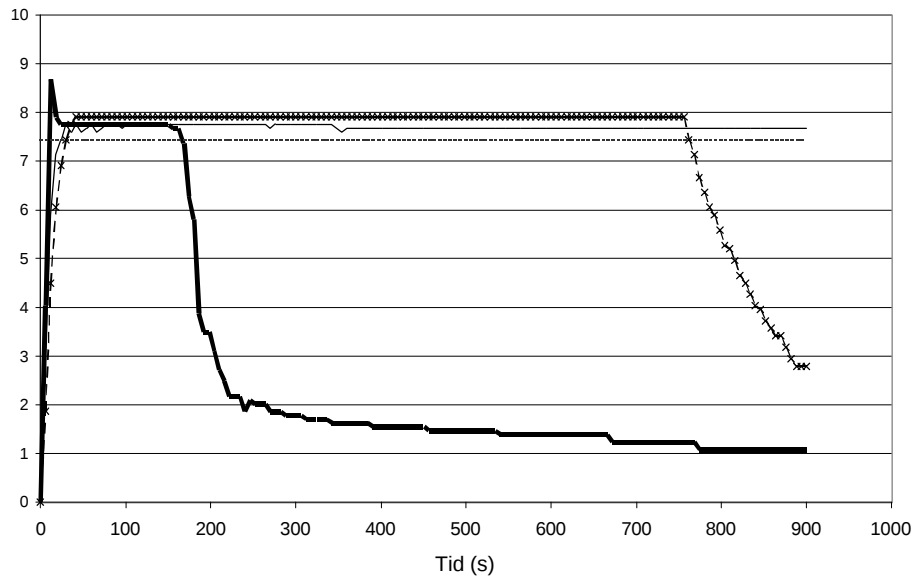
A.2.7
Koncentrationsmätning HFC-236fa
-15C



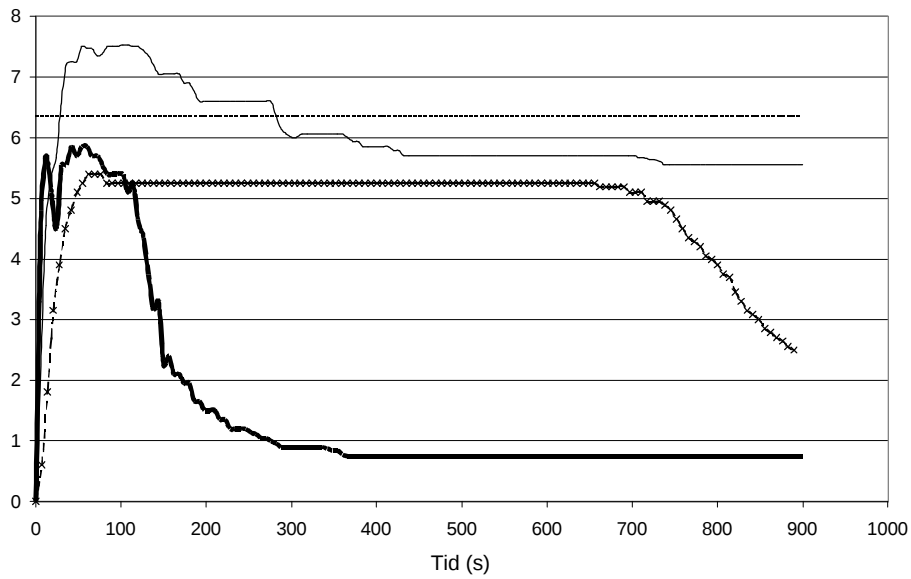
A.2.8
Koncentrationsmätning FS49C2
-15C



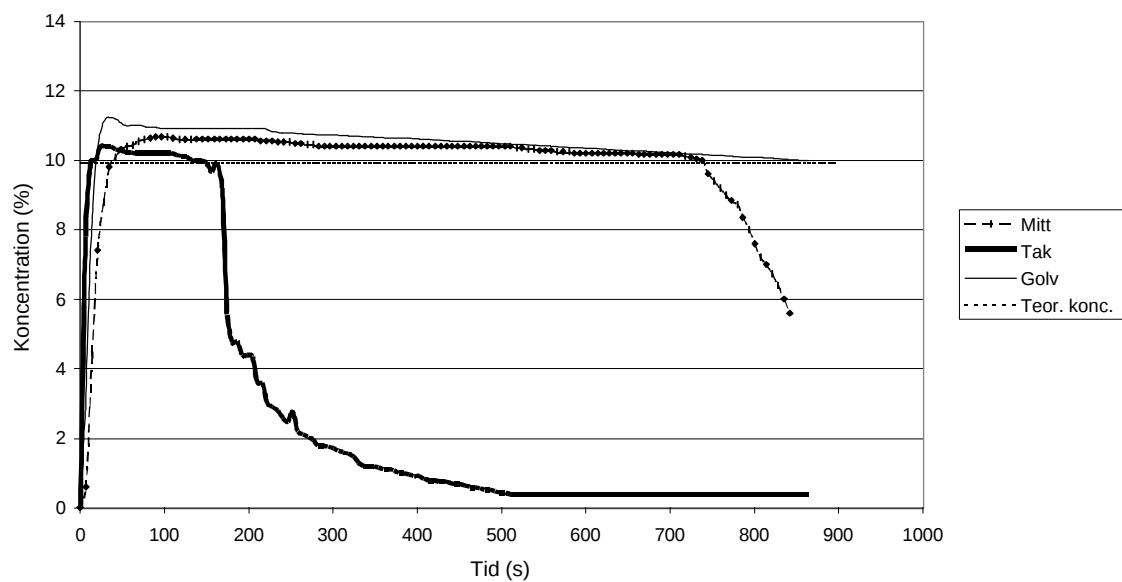
A.2.9
Koncentrationsmätning HFC-227ea
-15 C



A.2.10
Koncentrationsmätning HFC-236fa
-30C



A.2.11
Koncentrationsmätning FS49C2
-30C



A.2.12
Koncentrationsmätning HFC-227ea
-30C

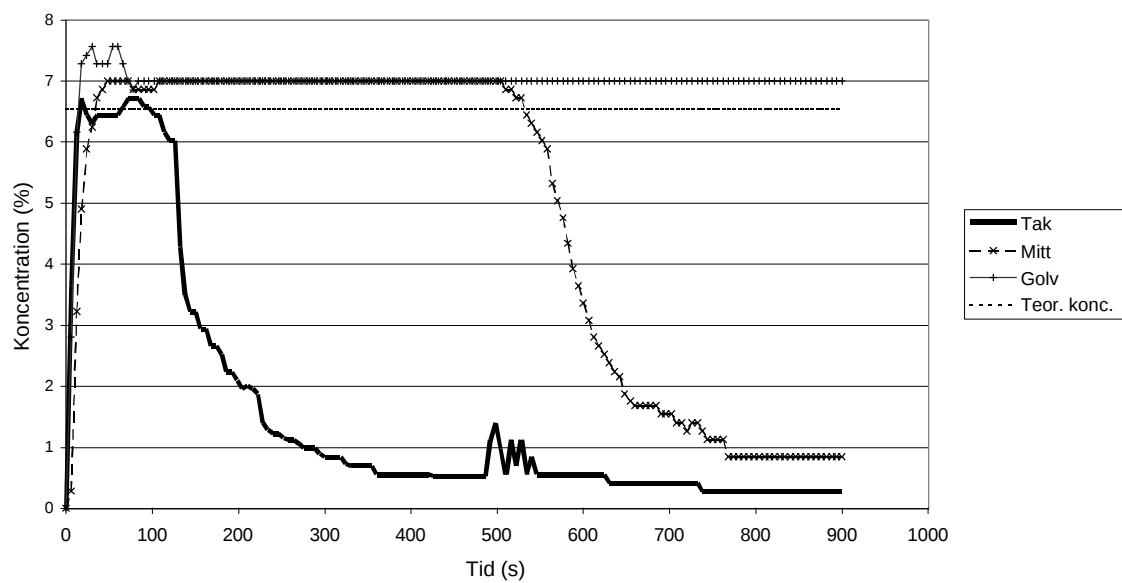
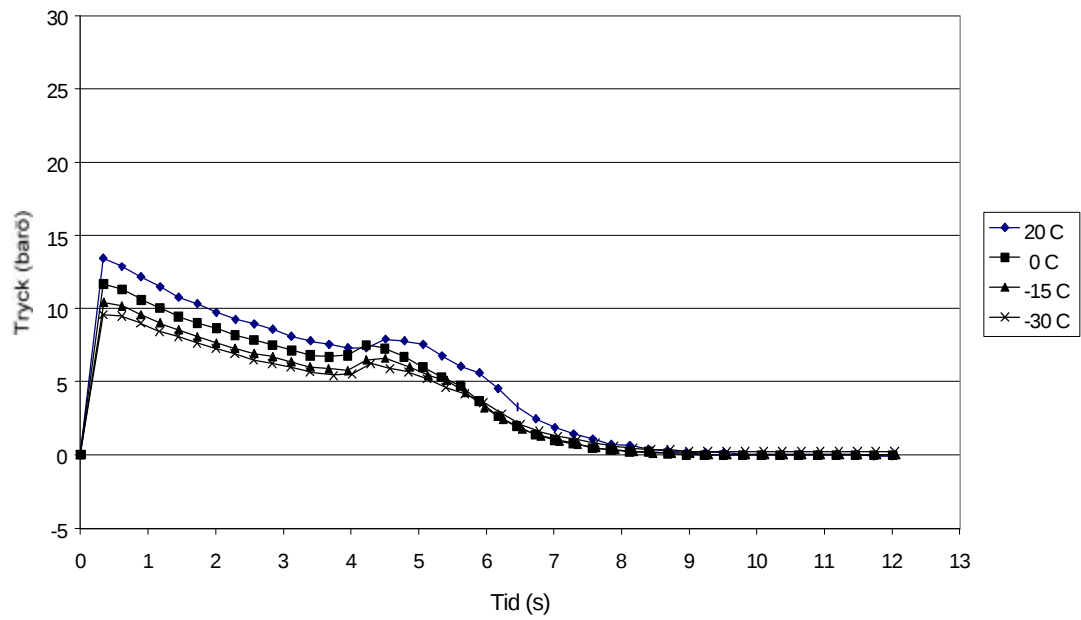
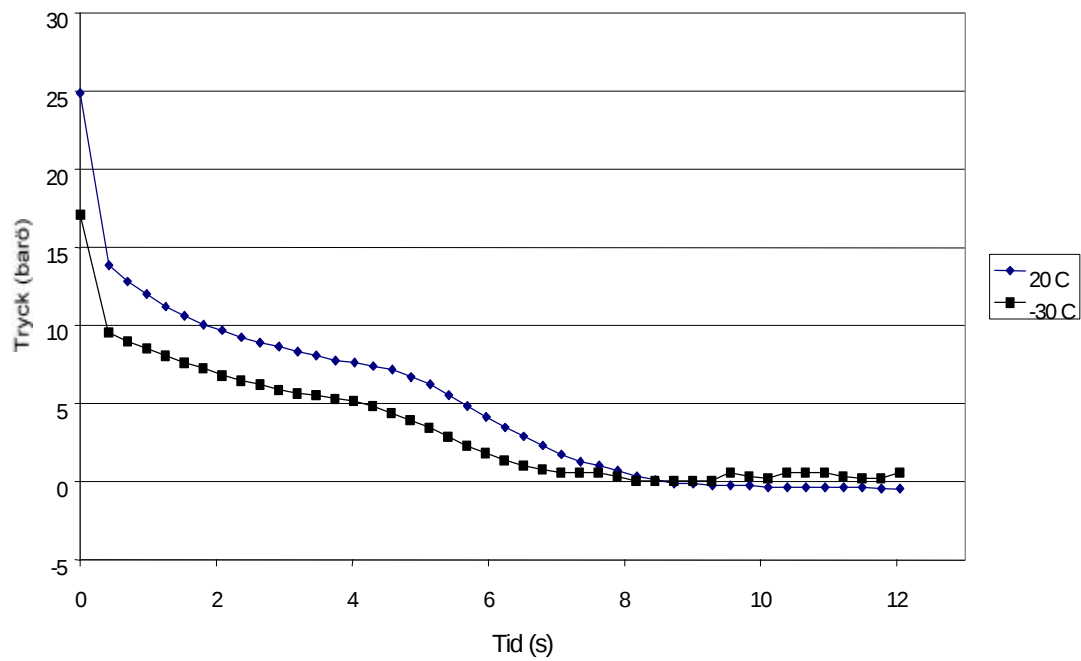


Diagram över tryckmätning för respektive släckmedel

A.3.1
Tryck HFC-236fa



A.3.2
Tryck HFC-227ea



A.3.3

Tryck FS49C2

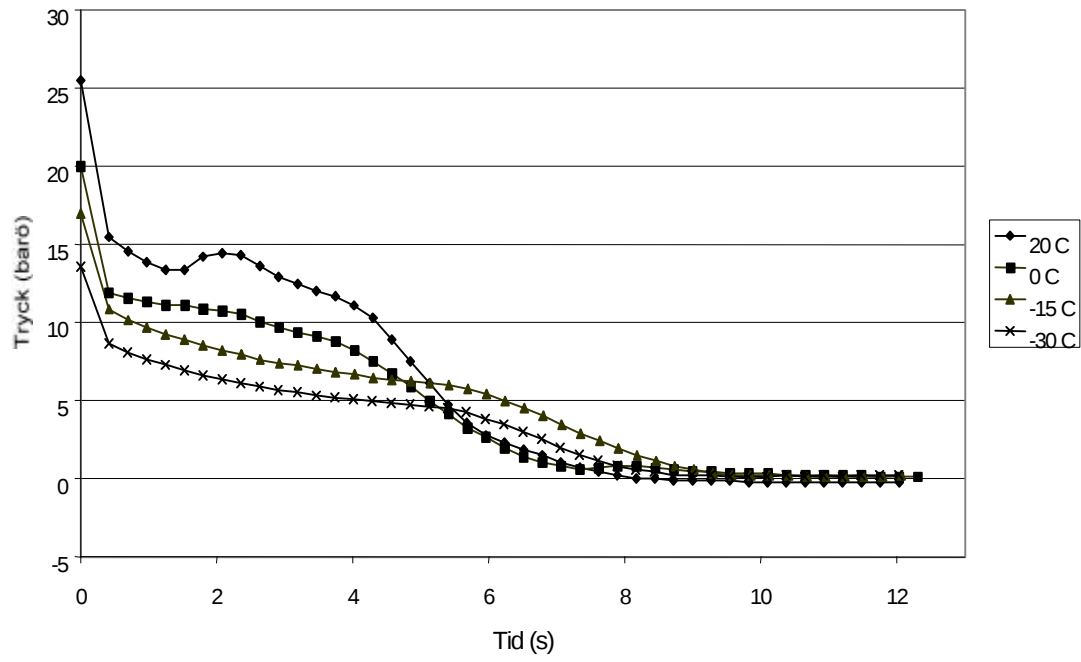
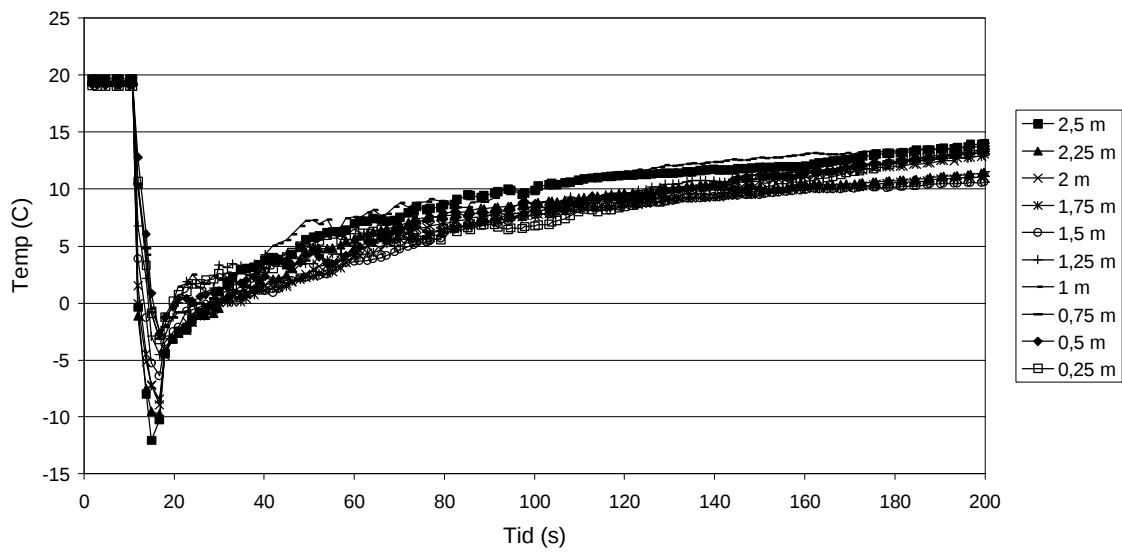


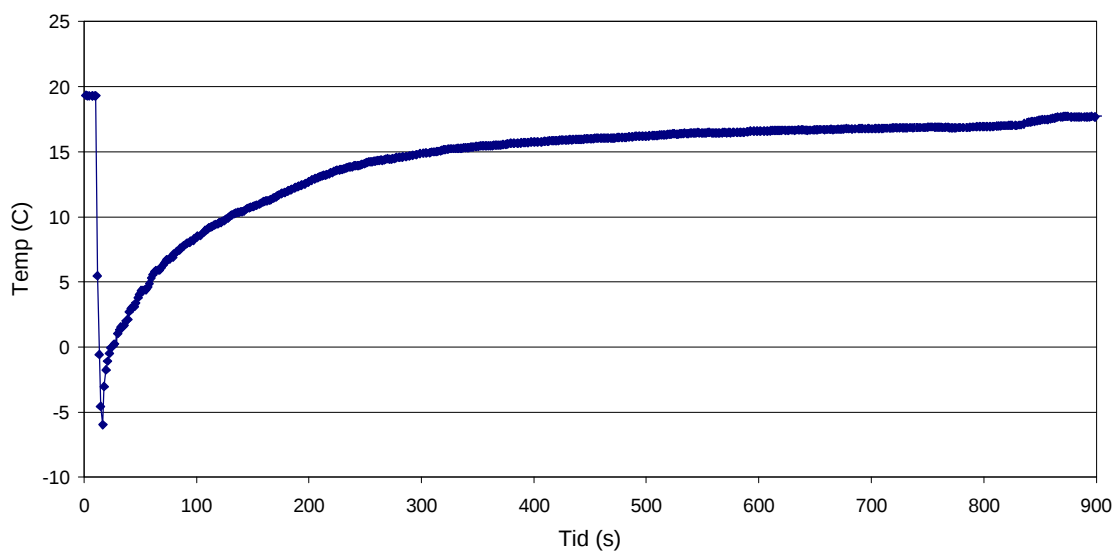
Diagram över temperaturmätningarna för varje försök.

För läsbarhetens skull har vi redovisat ett diagram över de 200 första sekunderna med alla mäthöjder inlagda. För att åskådliggöra temperaturfördelningen under hela försöket redovisas också ett diagram med medeltemperaturen.

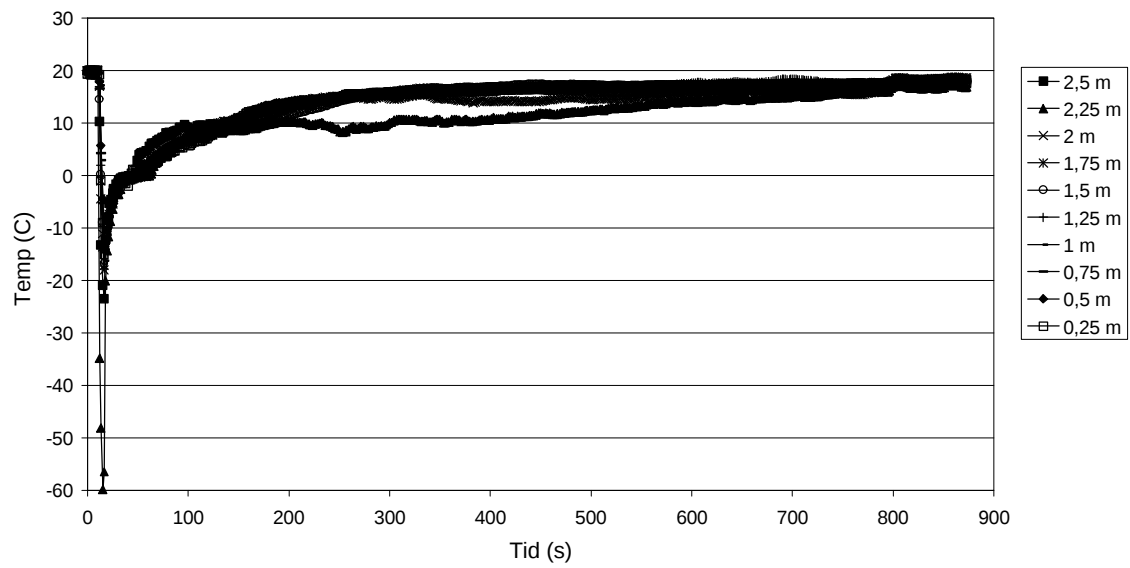
A.4.1
Rumstemperatur HFC-236fa
20 C



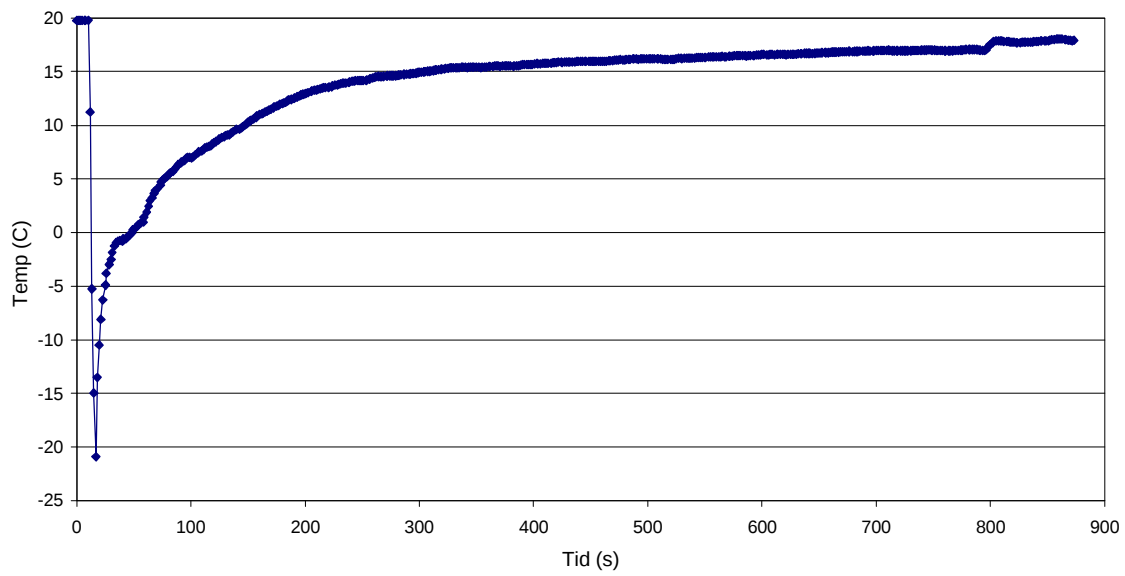
A.4.2
Medeltemp HFC-236fa
20C



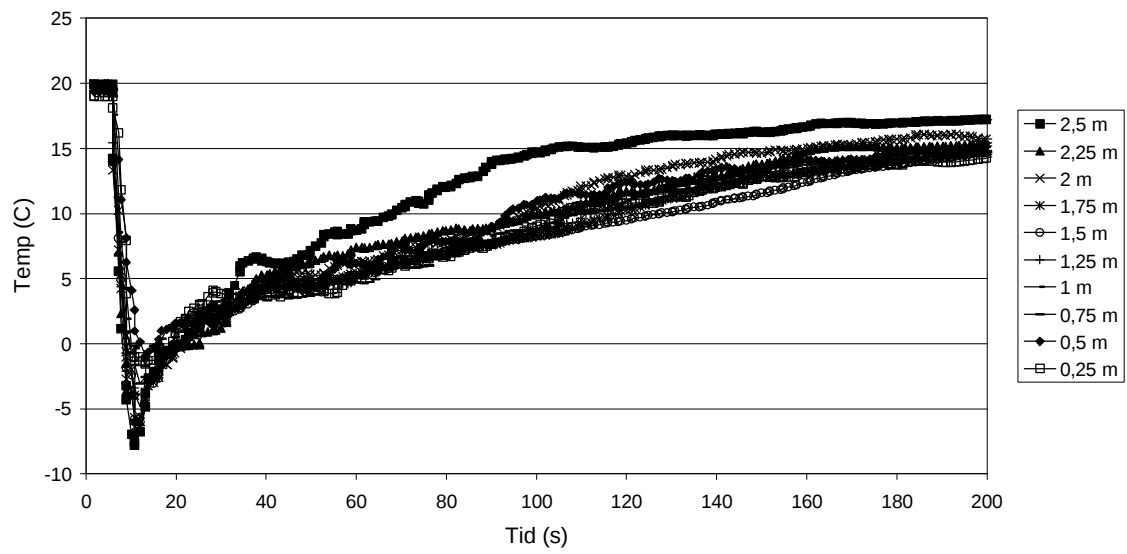
A.4.3
Rumstemperatur FS49C2
20 C



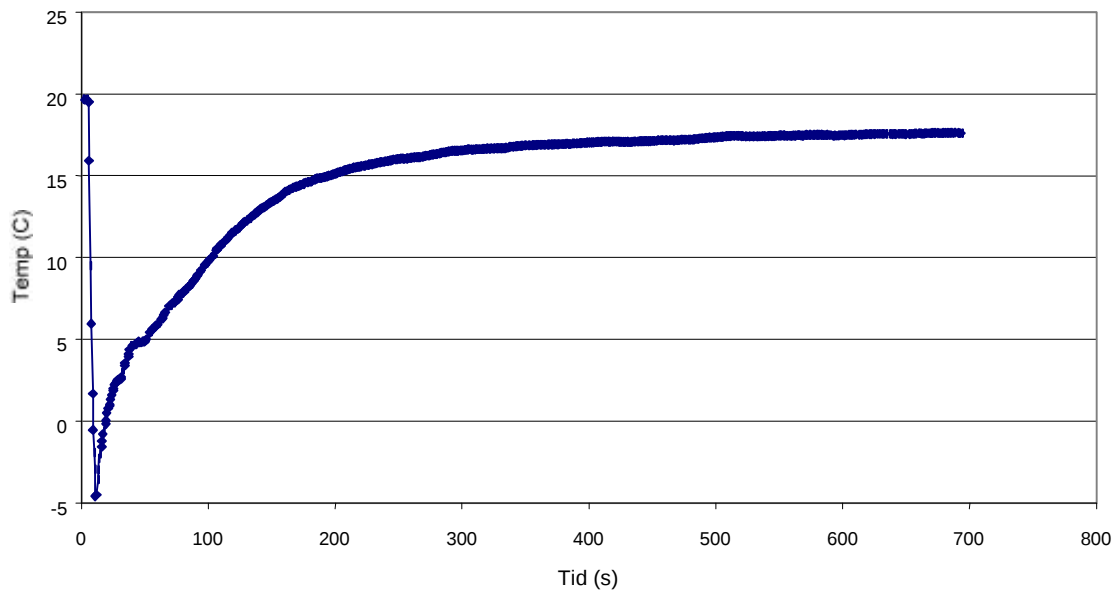
A.4.4
Medeltemp FS49C2
20C



A.4.5
Rumstemperatur HFC-227ea
20 C

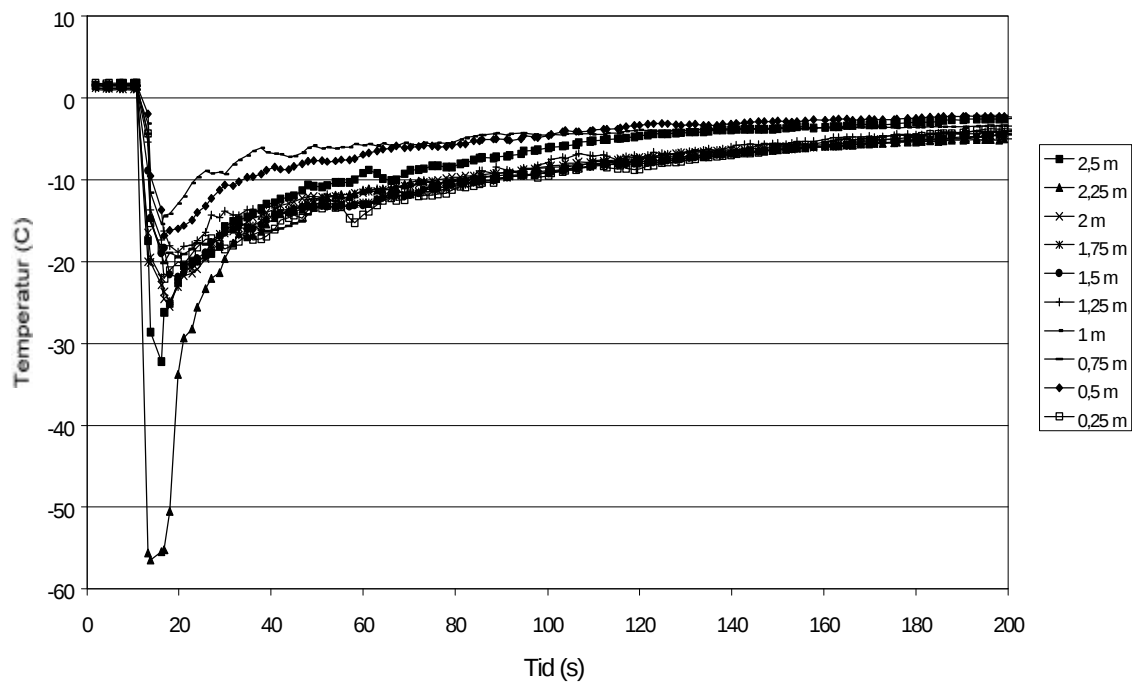


A.4.6
Medeltemp HFC-227ea 20 C



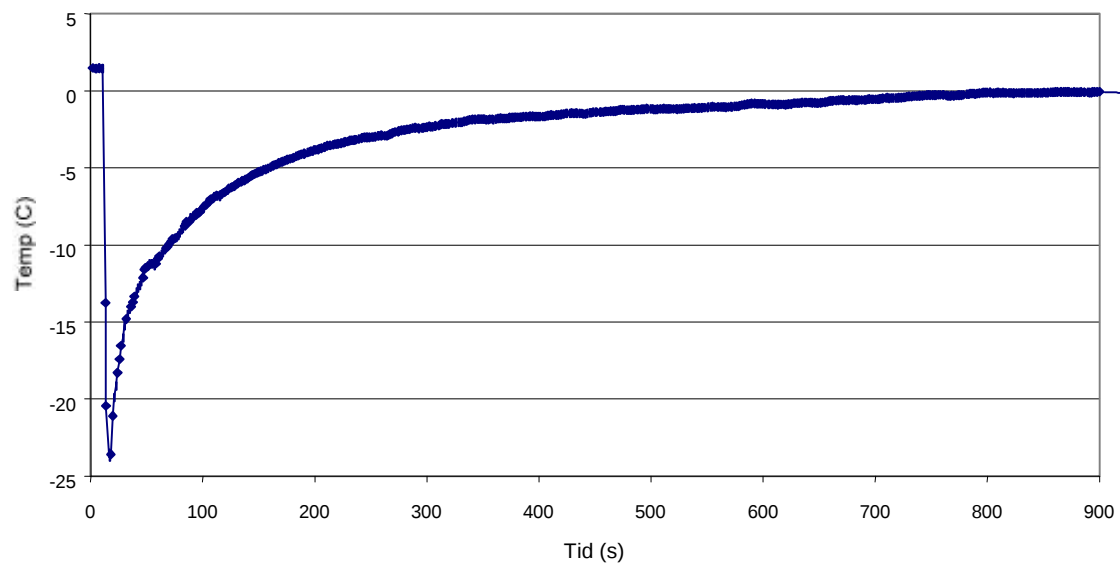
A.4.7

Rumstemperatur HFC-227ea
0 C



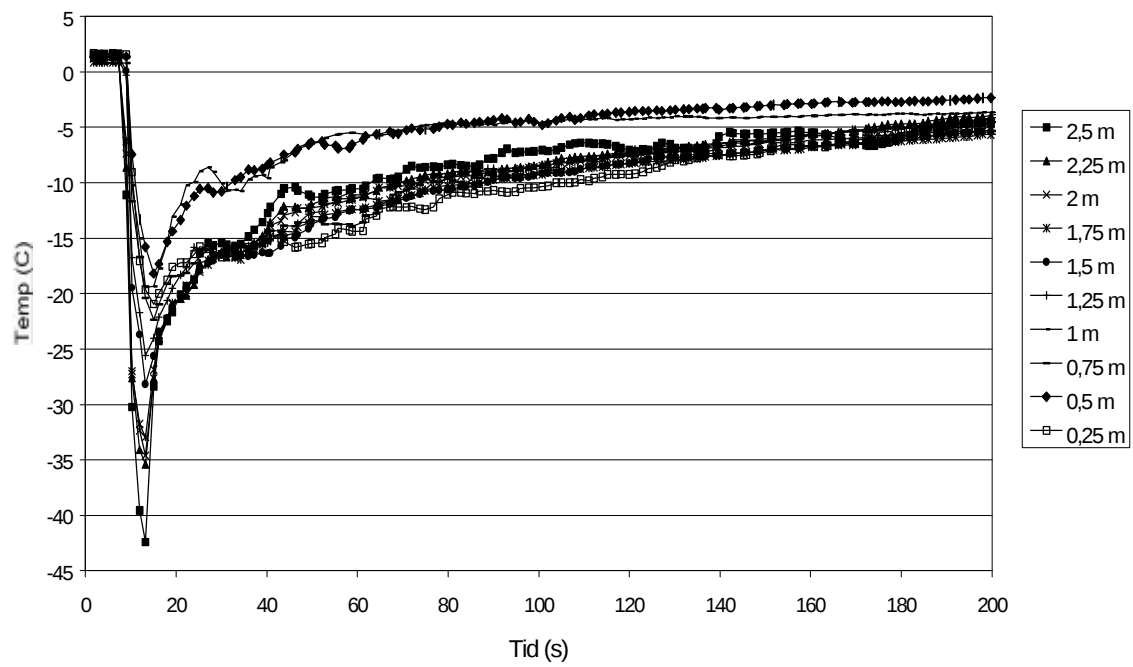
A.4.8

Medeltemp HFC-227ea
0 C



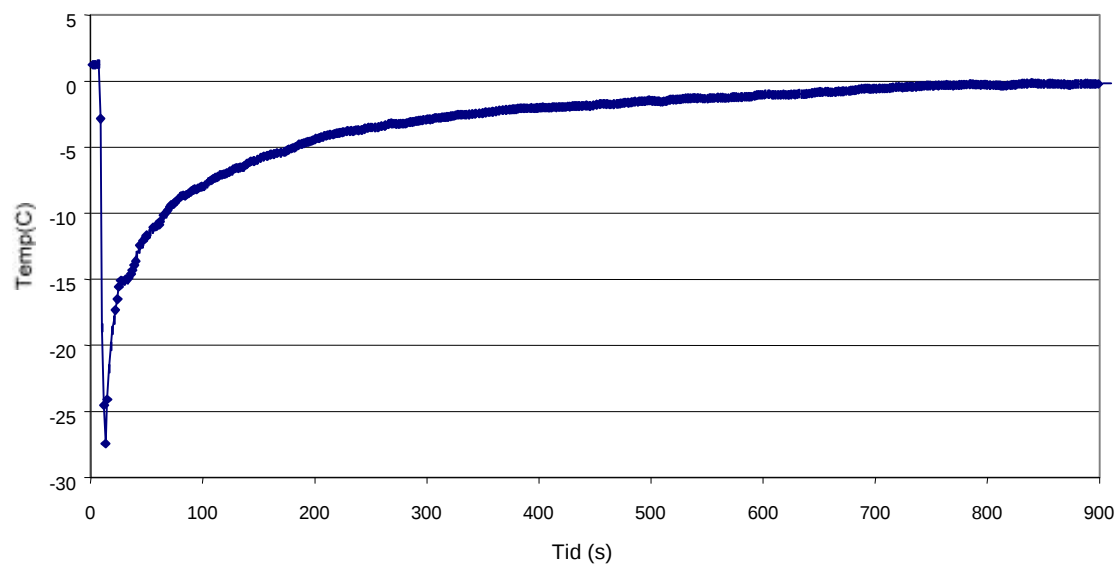
A.4.9

Rumstemperatur HFC-236fa
0 C

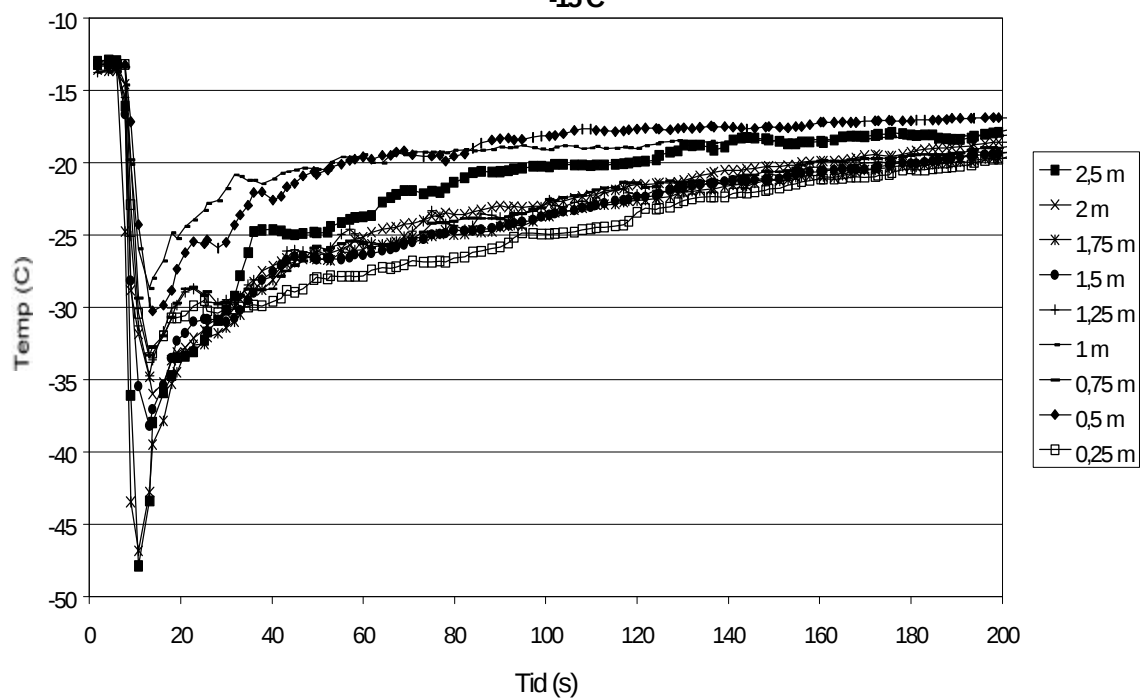


A.4.10

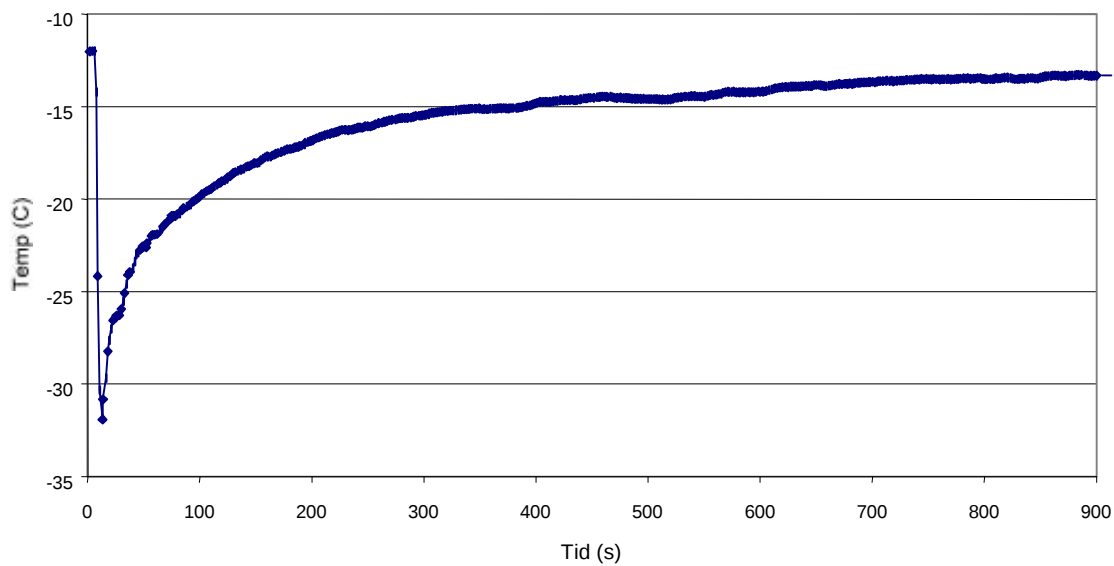
Medeltemp HFC-236fa
0 C



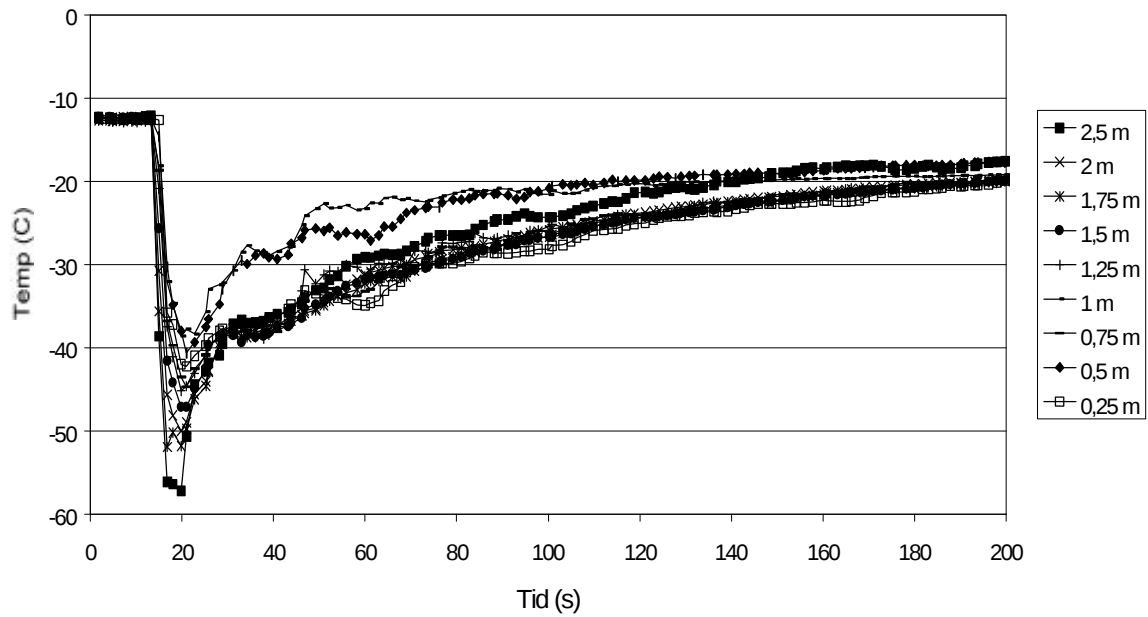
A4.11 Rumtemperatur HFC-227ea -15 C



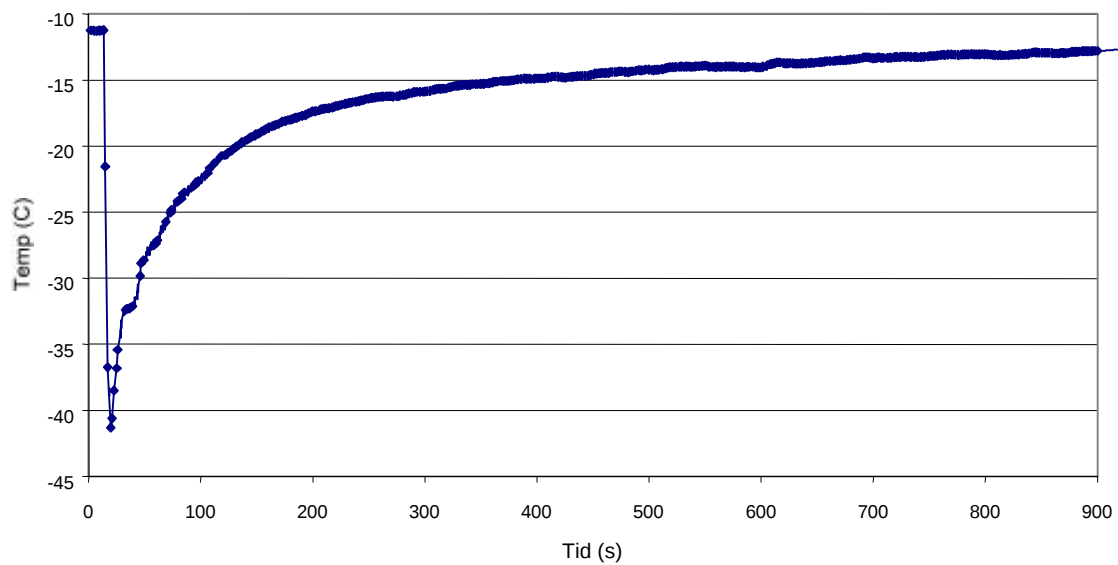
A.4.12 Medeltemp HFC-227ea -15 C



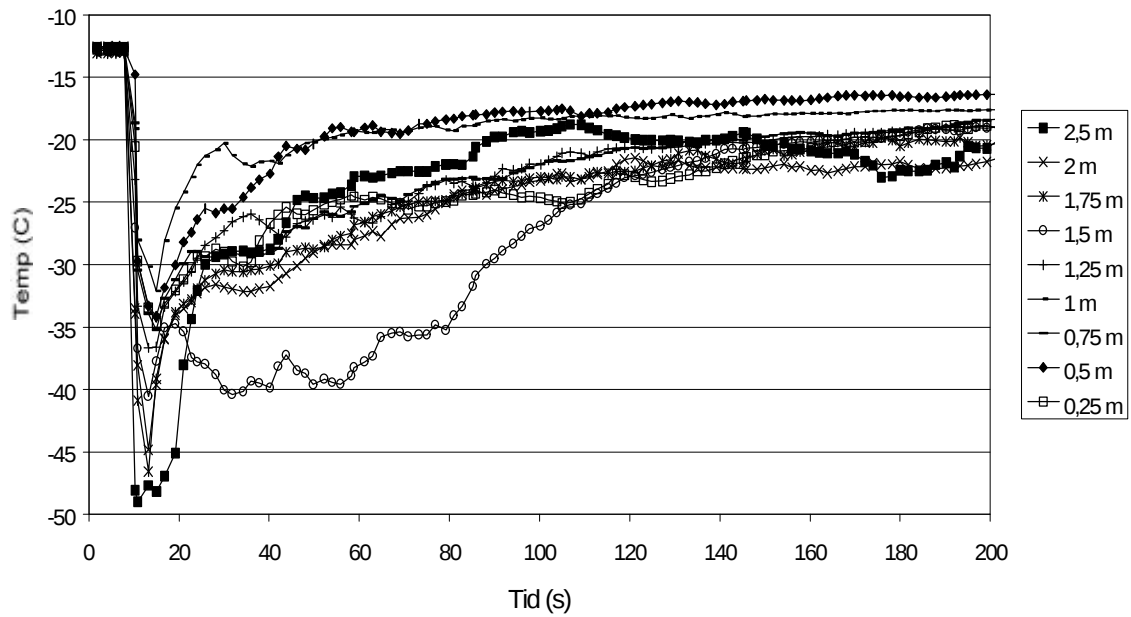
A.4.13
Rumstemperatur FS49C2
-15 C



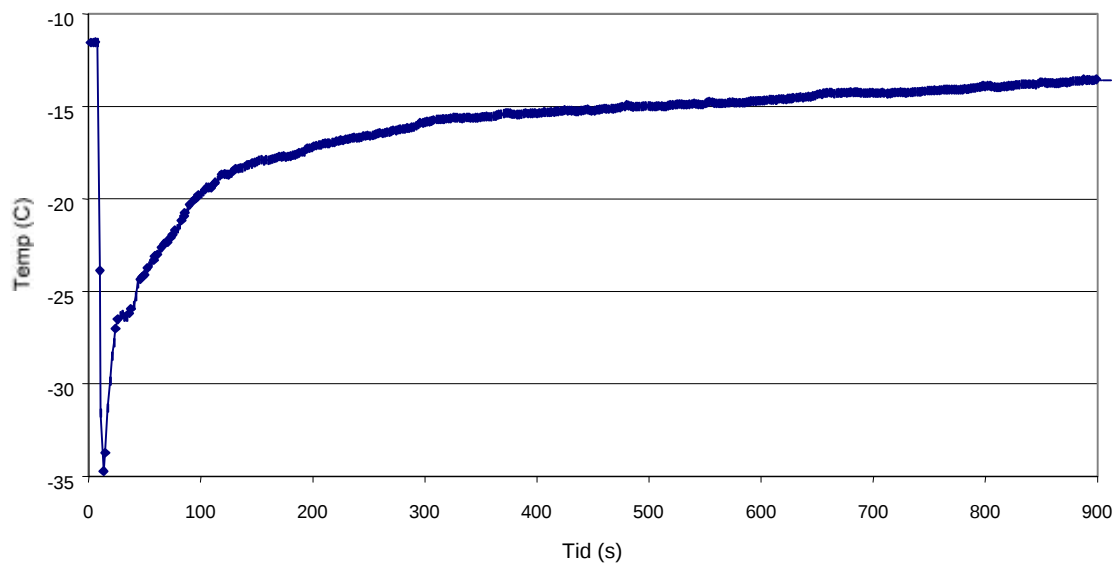
A.4.14
Medeltemp FS49C2
-15 C



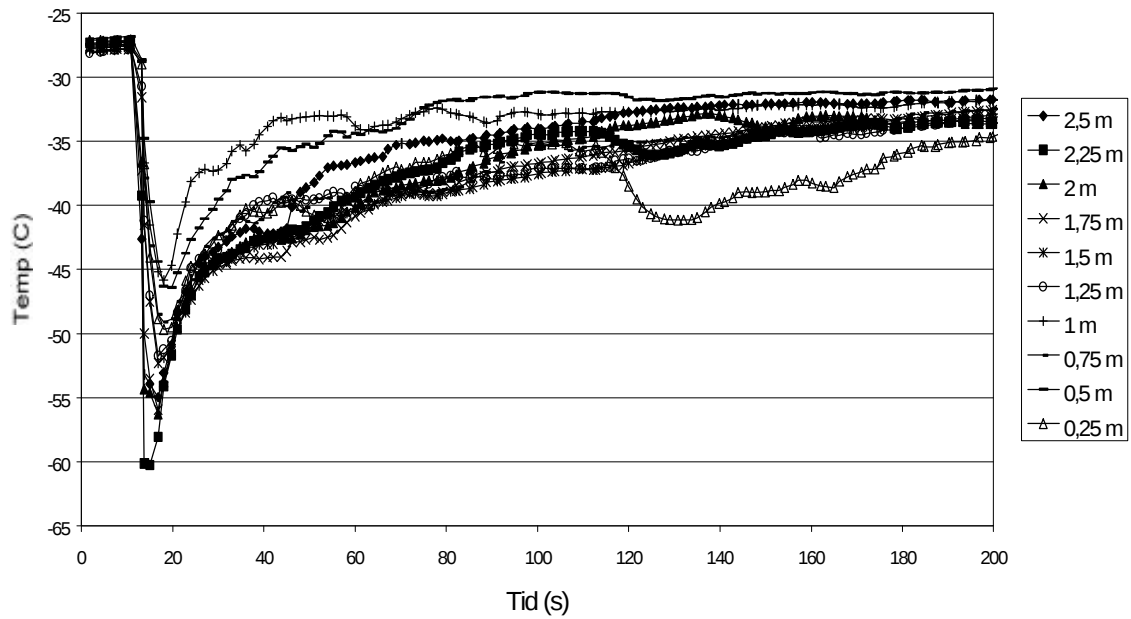
A4.15
Rumstemperatur HFC-236fa
-15 C



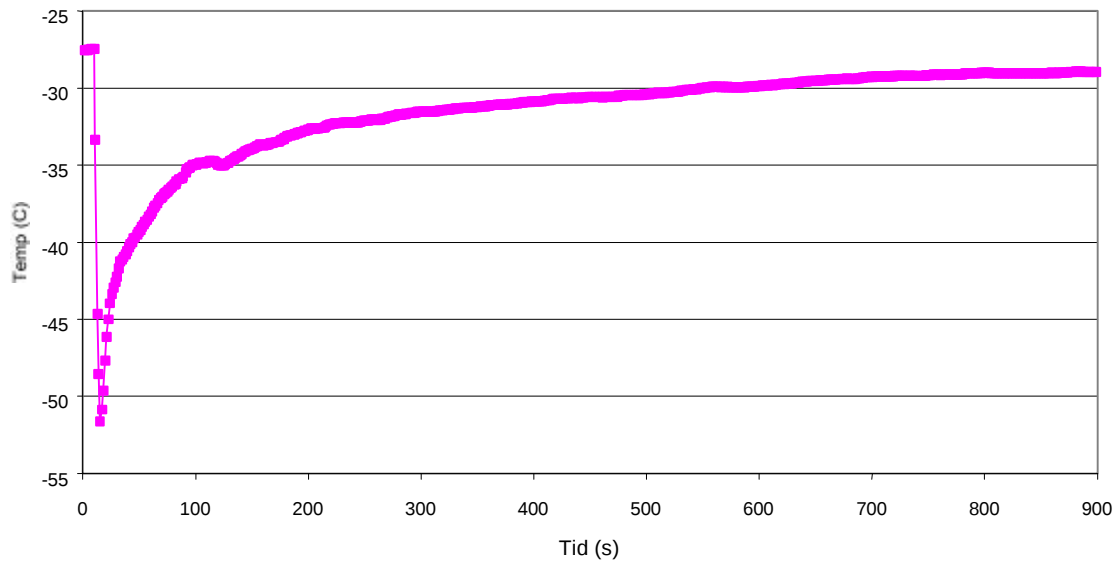
A.4.16
Medeltemp HFC-236fa
-15 C



A.4.17 Rumstemperatur HFC-227ea -30 C

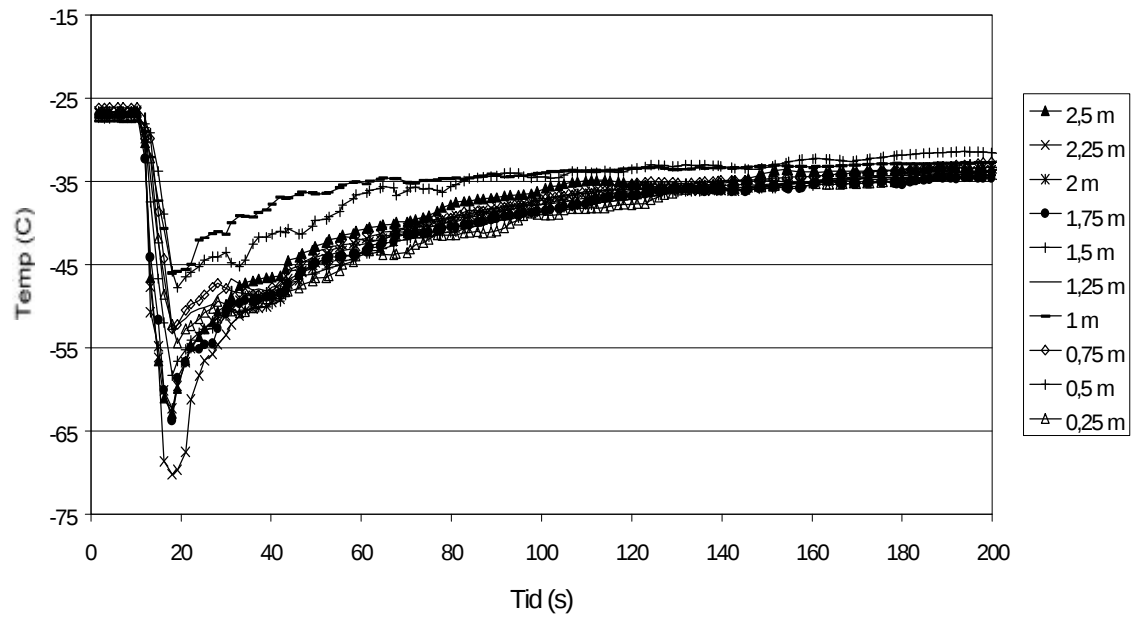


A.4.18 Medeltemp HFC-227ea -30 C



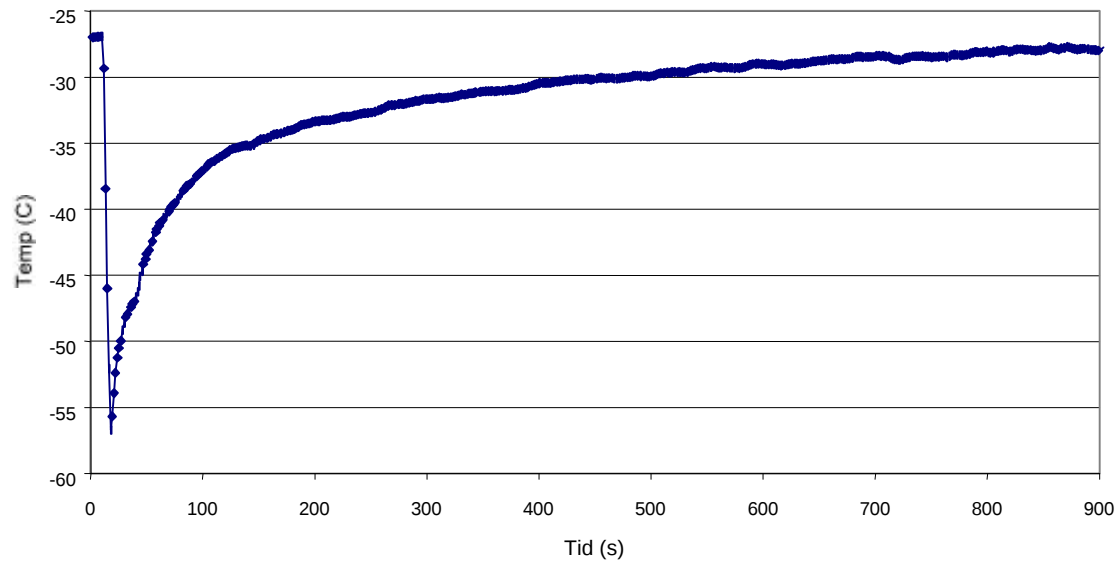
A.4.19

Rumstemperatur FS49C2
-30 C

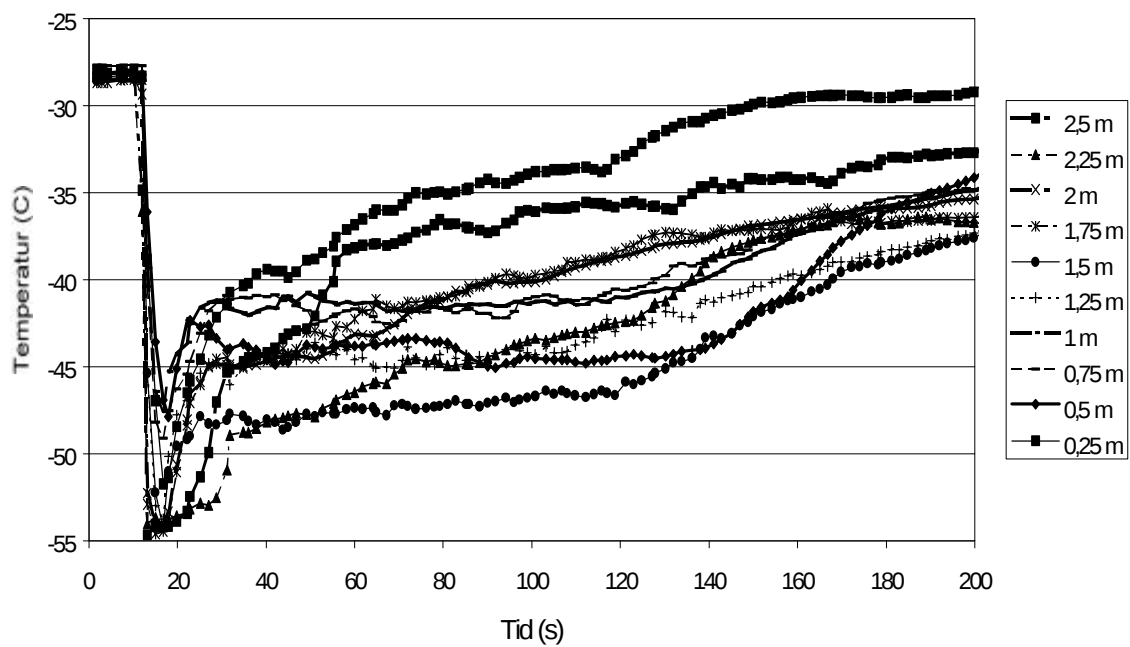


A.4.20

Medeltemp FS49C2
-30 C



A4.21 Rumstemperatur HFC-236fa -30 C



A.4.22 Medeltemp HFC-236fa -30 C

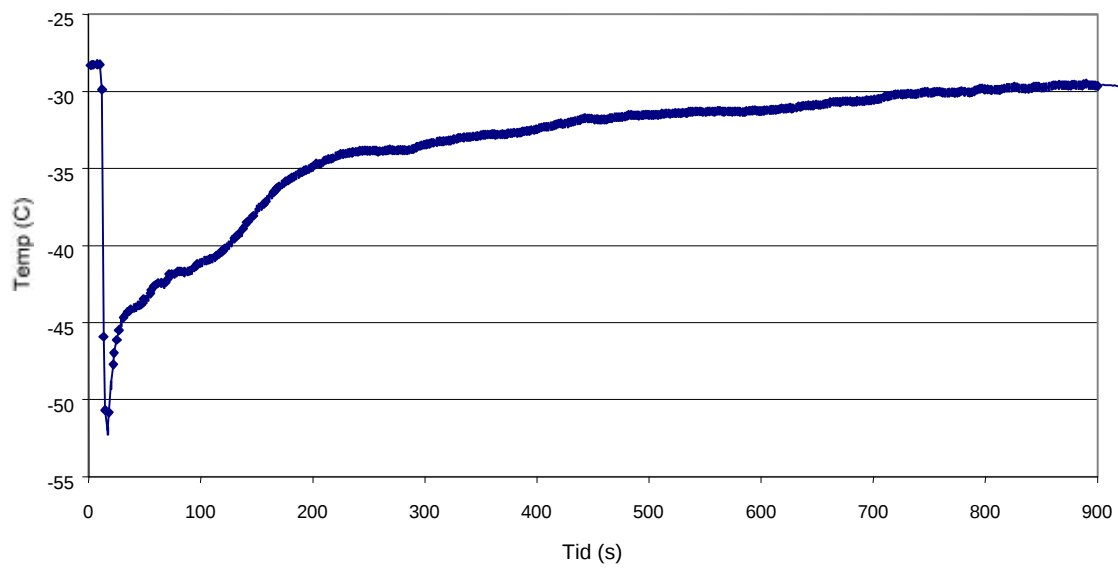


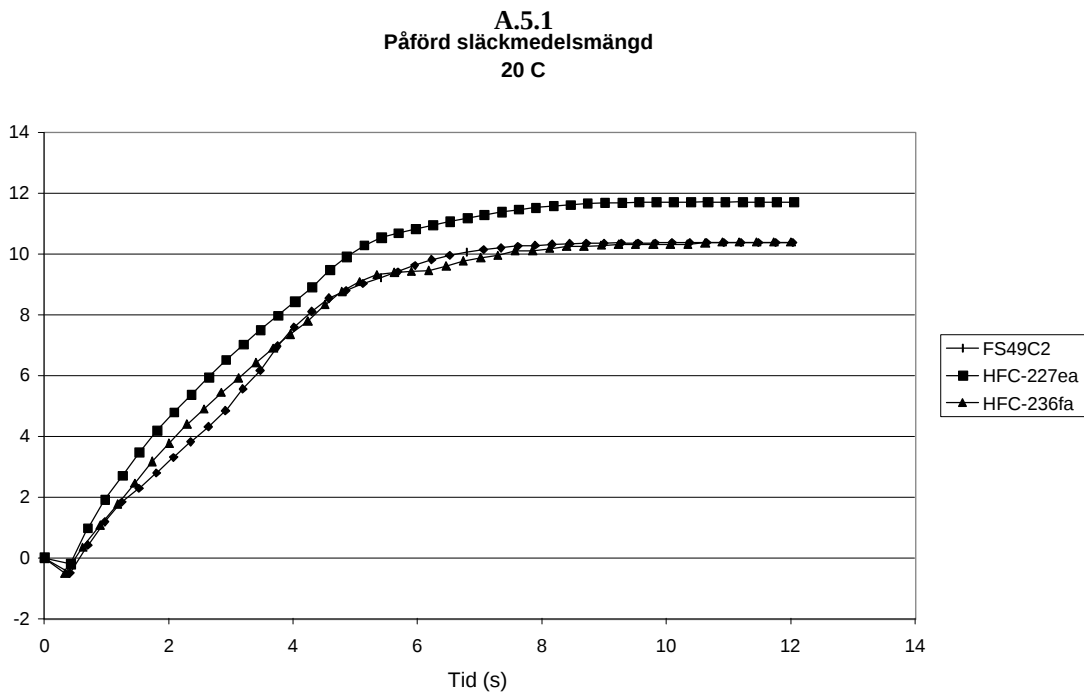
Diagram över påförd släckmedelsmängd.

Diagrammen redovisar integralen av massflödet vid varje temperatur, dvs den mängd släckmedel som lämnat släckmedelsbehållaren.

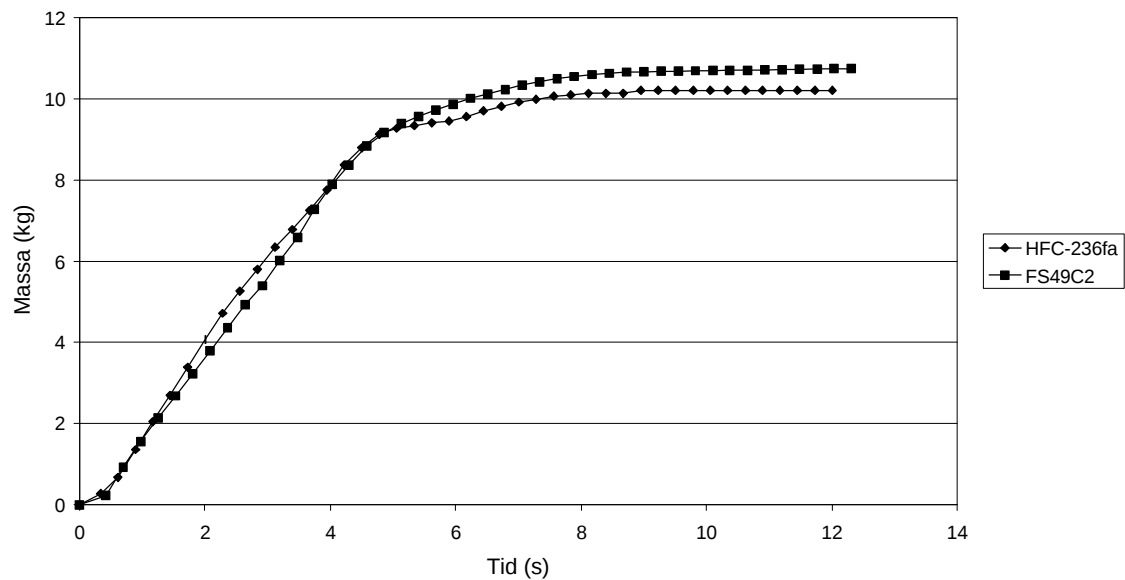
I tabell nedan redovisas den massa av varje släckmedel som användes vid försöken.

Namn	Behov (kg)
HFC-236fa	9.8
HFC-227ea	11.2
FS49C2	9.4

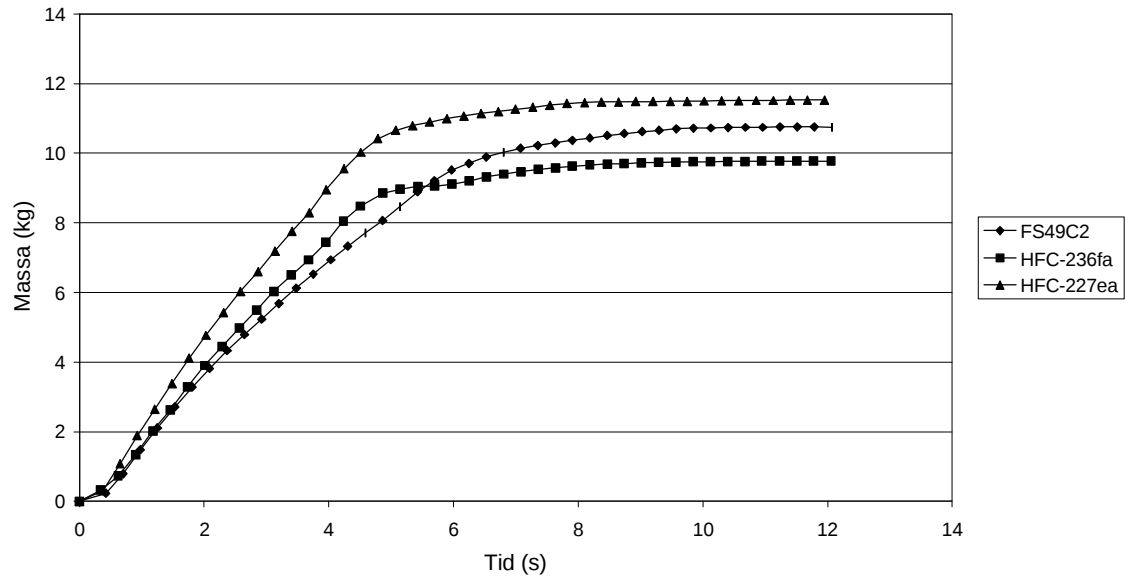
De differenser som upptäcks om man jämför diagrammen beror troligen av en kombination av vågens noggrannhet och att massan släckmedel kan skilja mellan de olika behållarna. Eftersom hela systemet vilar på vågen under utlösning kan också vibrationer och stötar påverka mätningen.



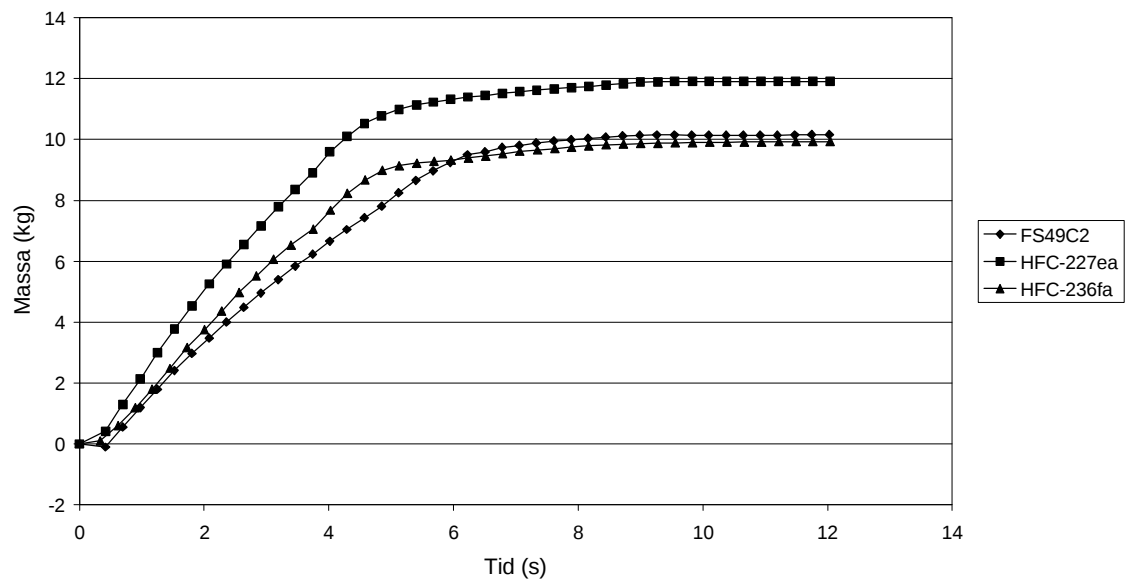
Påförd släckmedelsmängd
0 C



Påförd släckmedelsmängd
-15 C



Påföringsmängd släckmedel
-30 C



Appendix B

Ångtryckets temperaturberoende

De båda släckmedel som har en kokpunkt som väsentligt överstiger den lägsta förväntade temperaturen (-30) är HFC-227ea och HFC-236fa. Ett värde på ångtrycket på exakt 1 atmosfär motsvarar kokpunkten i temperatur. Över kokpunkten är ångtrycket större än en atmosfär och under kokpunkten är ångtrycket mindre än en atmosfär. Då ångtrycket ges i storheten atmosfärer motsvarar också denna siffra den maximala fraktion av släckmedlet som luften kan innehålla. Till exempel om ångtrycket är 0,5 atmosfärer, kan luften maximalt innehålla 50 % släckmedel. Med detta klart för sig kan man börja misstänka att det finns en temperatur under vilken man inte kan uppnå den erforderliga koncentrationen av släckmedlet. För de två ovan nämnda släckmedlen kan man tänka sig att denna punkt kan komma att finnas inom det undersökta temperaturintervallet. Det kan därför vara värt att undersöka ångtrycket som funktion av temperaturen för dessa två gaser vid de aktuella temperaturerna. Om ångtrycket understiger det korresponderande dimensionerande koncentrationen kommer släckmedlet att förångas tills den maximala koncentrationen är nådd, varefter inget mer släckmedel kan fås att förångas. I så fall kommer den dimensionerade koncentrationen aldrig att uppnås, om inte utrymmet värms upp. Det är därför självklart att detta kan vara en nackdel och man kan på detta sätt formulera en temperatur under vilken släckmedlet absolut inte kan användas. Ångtrycket som funktion av temperaturen presenteras nedan i tabellform. Notera att siffrorna för HFC-236fa är konverterade från engelska enheter (Fahrenheit/Psia), varför vissa av siffrorna har avrundats.

Tabellerna nedan visar att det inte blir några problem med koncentrationen vid de aktuella temperaturerna. Den maximala koncentrationen vid -30 °C blir ca 22 % för HFC-236fa och ca 45 % för HFC-227ea. Det förtjänar dock att påpekas att förångningen går långsammare och långsammare ju närmare maximal koncentration man kommer. Detta innebär att det ändå kan vara en nackdel att ha en låg maximal koncentration. Det är alltså även ur denna synpunkt önskvärt att släckmedlet har en så låg kokpunkt som möjligt.

Tabeller över ångtrycket för HFC-227ea och HFC-236fa

HFC-236fa

T(C)	P(atm)
-73.3	0.007
-67.8	0.020
-62.2	0.031
-56.7	0.047
-51.1	0.070
-45.6	0.101
-40.0	0.143
-34.4	0.200
-28.9	0.270
-23.3	0.363

-17.8	0.479
-12.2	0.623
-6.7	0.800
-1.1	1.014
4.4	1.271
10.0	1.576
15.6	1.936
21.1	2.356
26.7	2.842

Tabell B.1. Källa:[10]

HFC-227ea

Temp (C)	P (atm)
-50	0,299
-40	0,320
-39	0,338
-38	0,356
-37	0,375
-36	0,396
-35	0,416
-34	0,438
-33	0,461
-32	0,486
-31	0,510
-30	0,536
-29	0,563
-28	0,590
-27	0,620
-26	0,649
-25	0,681
-24	0,714
-23	0,747
-22	0,783
-21	0,818
-20	0,856
-19	0,895
-18	0,936
-17	0,977
-16	1,019
-15	1,065
-14	1,110
-13	1,159
-12	1,208
-11	1,258
-10	1,312
-9	1,366
-8	1,421
-7	1,479
-6	1,539
-5	1,600
-4	1,664
-3	1,729
-2	1,796
-1	1,865
0	1,936
1	2,009
2	2,085

3	2,162
4	2,242
5	2,324
6	2,409
7	2,495
8	2,584
9	2,676
10	2,769
11	2,865
12	2,965
13	3,065
14	3,170
15	3,277
16	3,385
17	3,498
18	3,612
19	3,730
20	3,851
21	3,974
22	4,101
23	4,230
24	4,362
25	4,498
26	4,637
27	4,779
28	4,924
29	5,072
30	5,224
31	5,379
32	5,538
33	5,699
34	5,865
35	6,035
36	6,208
37	6,384
38	6,565
39	6,749
40	6,937
41	7,129
42	7,324
43	7,524
44	7,728
45	7,936
46	8,148
47	8,365

48	8,585
49	8,810
50	9,040

Källa: [9]

Appendix C

Släckmedelsdroppars uppträdande.

I syfte att undersöka möjligheterna för att konstruera ett släckmedelssystem som fungerar bättre under släckmedlets kokpunkt, samt för att något illustrera hur en vätskedroppe kan tänkas uppföra sig då den lämnat dysan, kan en del beräkningar utföras. Då släckmedlet befinner sig under kokpunkten kommer släckmedlet att uppträda som vätska då den lämnat dysan. Dropparna som kommer ut kommer att vara olika stora, och man kan genom mätningar fastställa en fördelning för storleken för en viss dysa, vid ett visst drivtryck och temperatur. Detta har dock inte utförts i försöken och följaktligen finns inga experimentella data för hur stora dropparna är. Man kan dock anta att dropparna initialt inte överstiger någon millimeter i storlek, eftersom de då slits sönder i den kraftiga luftströmmen vid utlösning. Då dropparna sedan rör sig i vätskesprayen från dysan kan de slås ihop till större droppar. Denna effekt utelämnas helt här. De mekanismer som styr droppens förångning då den svävar fritt i luften eller rör sig med en "påvingad" hastighet då den slungats ut från dysan är helt annorlunda än de som styr förångningen då droppen fastnat på en yta. Ingen beräkning på en sådan droppe, som först slungas ut, sedan svävar fritt, och slutligen fastnar på en yta innan den helt förångats, kommer att utföras. Endast de två första förloppen kommer att beräknas. Då droppen förångas kommer det delvis att ske adiabatiskt, genom att droppen hämtar energi från sig själv för att förångas, och delvis genom värmetransport till droppen. Detta innebär att droppen kommer att anta en lägre temperatur än den omgivande luften, vilket också är helt uppenbart då man betraktar de temperatur-tid-diagram som uppmätts i försöken. De ekvationer som styr droppens förångning och uppträdande hämtas från [8]. Vissa modifikationer kommer att göras för att passa det fall som föreligger. Den grundläggande ekvationen är som följer:

$$\text{c.1} \quad \frac{dD}{dt} = -\frac{2h\Delta T}{H_v \rho}$$

D betecknar droppens diameter (m), t betecknar tid (s), h betecknar värmeövergångstalet ($\text{W/m}^2\text{K}$), ΔT betecknar temperaturskillnad mellan droppe och omgivning (K eller C), H_v betecknar förångningsenergi (kJ/kg), ρ betecknar droppens densitet (kg/m^3). För små droppar kan parametern h beräknas genom Nusselts tal, (betecknas i fortsättningen Nu), som i sin tur kan baseras på två dimensionslösa tal, Prandtls tal (Pr) samt Reynolds tal (Re). Prandtls tal är konstant relativt hastigheten och kan därför i detta fall hållas för konstant. Reynolds tal, däremot, beror på droppens hastighet relativt omgivande gas samt droppens diameter.

Eftersom [8] i de färdiga formlerna endast berör sådana droppar som befinner sig i fritt fall, dvs droppen har sin egen naturliga hastighet, kan dessa inte användas för att lösa droppens uppträdande i det första fallet då den lämnar dysan med en påvingad hastighet. Det blir därför nödvändigt att lösa en differentialekvation för att kunna beskriva detta fall. För att beskriva parametern h kan följande ekvation uppställas:

$$\text{c.2} \quad Nu = \frac{hD}{k} = 2 + 0.6 \text{Pr}^{0.33} \text{Re}^{0.5}; \text{Re} = \frac{vD\rho_{\text{gas}}}{\mu}$$

I formeln ovan betecknar v droppens hastighet relativt gasen (m/s), μ betecknar luftens viskositet (kg/ms).

Ur c.2 kan man göra det antagandet, att endast D ändras med tiden. Övriga parametrar förändras visserligen med temperaturen i gasen som omger droppen, men denna kan antas konstant. Vidare kan man, för att förenkla, anta att även om koncentrationen av gasformigt

släckmedel i slutfasen är ca 10 % kommer denna blandning att ha väsentligen samma fysikaliska egenskaper som ren luft. Ekvation c.2 stuvras om enligt följande:

$$c.3 \quad \frac{k \times Nu}{D} = h \Rightarrow \frac{dD}{dt} = \frac{2k \times Nu \Delta T}{H_v r D}$$

Samtidigt vet vi från ekv. c.2 att:

$$c.4 \quad Nu = 2 + 0.6 Pr^{0,33} Re^{0,5}; Re = \frac{v D r_{gas}}{m} \Rightarrow Nu = C \times \sqrt{\frac{v D r_{gas}}{m}}$$

(C betecknar en allmän konstant) Vi vet även att endast parametern D i Re förändras med tiden, vilket medför att:

$$c.5 \quad Nu = C \sqrt{D}$$

Detta medför att ekv. c.1 kan skrivas om ytterligare från den ändrade formeln i x.3:

$$c.6 \quad \begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= \frac{2k \times Nu \Delta T}{H_v r D} = \frac{2k \times C \times \sqrt{D} \times \Delta T}{H_v r D} = \frac{2k \times C \times \Delta T}{H_v r \sqrt{D}} \Rightarrow \\ \sqrt{D} dD &= \frac{2k \times C \times \Delta T}{H_v r} dt \Rightarrow \\ \int_{D_0}^D \sqrt{D} dD &= \int_{t=0}^t \frac{2k \times C \times \Delta T}{H_v r} dt \end{aligned}$$

Randvillkoren är att för t=0 har droppen sin ursprungsstorlek D₀, samt att då D=0 är droppen förintad och ekvationen slutar att ha en mening efter detta. Denna ekvation är lösbar och blir enligt följande efter att den integrerats:

$$c.7 \quad \frac{D^{1,5}_0 - D^{1,5}}{1,5} = \frac{2k \times C \times \Delta T}{H_v r} t \Rightarrow D^{1,5}_0 - D^{1,5} = \frac{3k \times C \times \Delta T}{H_v r} t$$

Denna ekvation blir något krångligare att arbeta med än de som presenteras i [8], men går ändå att använda. För varje specifikt tillfälle måste C beräknas för aktuell hastighet, omgivande gas, etc.

Nu kan alltså en hypotetisk droppes färd från dysa till upplösning beräknas med de antaganden och reservationer som gjorts ovan. Ytterligare antaganden måste dock först formuleras.

Då droppen lämnar dysan beror dess hastighet på det statiska trycket inuti behållaren. En teoretisk hastighet kan beräknas med Bernoullis ekvation om man antar att rören är friktionslösa. Detta tryck beror på släckmedel och vilket tryck behållaren laddats till från början, i rumstemperatur.

Vidare måste en temperaturskillnad antas. Man kan då anta att det finns ca 10% släckmedel i rummet samt att vätskans temperatur sjunker genom adiabatisk förångning tills att mättnadstrycket motsvarar en koncentration på 10%, dvs att mättnadstrycket vid temperaturen är 0,1 atm. Denna temperatur är släckmedelsspecifik, och kan utläsas ur diagram över ångtryck för respektive släckmedel.

Efter ett par meter kommer droppen att bromsas upp och istället i princip falla fritt i sin egen hastighet. Hur lång denna sträcka blir beror på droppens storlek, sprayens konvinkel, samt hur dropparna i sprayen interagerar. Man kan enkelt anta att ett sådant avstånd ligger kring ett par meter, säg 2.

Beroende på geometrin i utrymmet där ett släcksystem sitter monterat, kommer strålen eventuellt att träffa väggen, vilket innebär att en del droppar fastnar där. Dessa droppars förångning styrs då av andra mekanismer än de ovan presenterade. För beräkningens skull antar vi att droppen inte träffar någon vägg utan tillåts röra sig fritt genom luften.

Beräkning av en hypotetisk droppe under utströmningen

Droppens initialhastighet beräknas:

$$\text{c.8} \quad P_{stat} = \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2P_{stat}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 101,3 \times 10^3}{1360}} = 38,59 \text{ m/s}$$

Droppen bromsas snabbt upp, varför man kan anta en medelhastighet på ca 20 m/s genom hela utströmningsförloppet. Det tar då 0,104 sekunder att kastas två meter, innan droppen stannar och istället faller horisontellt. Därefter kan diametern efter detta förlopp beräknas enligt ekv. c.7. Konstanten C beräknas enligt:

$$\text{c.9} \quad C = 0,6 \text{Pr}^{0,33} \sqrt{\frac{\nu \rho_{luft}}{m}} = 0,6 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{20 \times 1,4128}{1,488 \times 10^{-5}}} = 961$$

ΔT har tagits som skillnaden mellan omgivande temperatur och den temperatur då ångtrycket för HFC-236fa är 0,1 atm (-46°C). Diametern kan efter beräkning enkelt omvandlas till volymsförhållande mellan start och slut. Samma förhållande gäller självklart även för massan.

$$\text{c.10} \quad \frac{V_0}{V} = \left(\frac{D_0}{D} \right)^3$$

Med de fysikaliska data som redovisas i denna rapport kan en beräkning utföras för att se i vilken storleksordning dropparna bör vara för att en förångning ska gå snabbt. Beräkningarna utförs så att slutdiameter beräknas för fallet då droppen rör sig med en medelhastighet på 20 m/s en sträcka av två meter. Därefter beräknas massförhållandet enligt c.10. Resultatet blir enligt följande:

Startdiameter (mm)	Volymratio HFC-227ea	Volymratio HFC-236fa
1	0,64	0,8
0,5	0,28	0,624
0,3	0,003	0,321
0,1	0	0

Ovan har förhållandet mellan startdiameter och slutdiameter beräknats för ett antal olika fall. Förhållandet 0 betyder att droppen förångats fullständigt under förloppet.

Som slutsats kan man i alla fall säga, att bör vara fullt möjligt att få dessa släckmedel att förånga snabbt och effektivt även vid så låga temperaturer som -30°C , förutsatt att man får en bra droppstorlek. Det bör vara möjligt att få så pass små droppar med specialbyggda munstycken, utan att göra avkall på andra parametrar som utströmningshastighet, systemets vikt etc. Notera även att beräkningarna ovan är utförda för de släckmedel som har sämst förutsättningar att förångas.