

Luftflaskor i varma miljöer

**En undersökning om uppvärmning av
kompositflaskor till andningsapparater**

Tor Lofström Johnsson
Kristoffer Roden

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

**Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Report 5354, Lund 2011

Luftflaskor i varma miljöer

**En undersökning om uppvärmning av kompositflaskor till
andningsapparater**

Tor Löfström Johnsson

Kristoffer Roden

Lund 2011

Titel: Luftflaskor i varma miljöer – En undersökning om uppvärmning av kompositflaskor till andningsapparater.

Title: Air cylinders in hot environments – An investigation of composite cylinders used in self contained breathing apparatuses.

Författare: Tor Löfström Johnsson, Kristoffer Roden

Report 5354

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--5354--SE

Number of pages: 61

Sökord

Luftflaskor, gasflaskor, kompositflaskor, andningsapparater, skyddsutrustning, räddningstjänst.

Keywords

Air cylinders, composite cylinders, firefighter equipment, SCBA, self contained breathing apparatus.

Abstract

With this work we have investigated how the air in the air cylinders of portable breathing apparatuses is heated during work in hot environments equal to those of interior fire extinguishing. The laws, regulations and standards concerning breathing apparatuses have been reviewed. We describe the theoretical relationships between heating and cooling as a result of air outtake and compare these to empirical tests, executed by measuring pressure and temperature at exposure to hot environments. The exposure lasted for five minutes at 250 °C and for 20 minutes at 115 °C. Our results show that the temperature of the gas does not exceed the maximum usage temperature provided by the manufacturers and that the heating does not imply any risk for the user. The cooling effect due to air outtake is distinct and compensates to some extent the heating from the surrounding environment.

© Copyright: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2011.

Författarna ansvarar för innehållet i rapporten.

Brandteknik och Riskhantering
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
and Systems Safety
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

Förord

Denna rapport är ett examensarbete inom brandingenjörsprogrammet vid Lunds universitet. Målgruppen är främst brandingenjörer och personal med anknytning till räddningstjänstverksamhet och då främst arbete med invändig brandsläckning. Författarna vill framföra sina varmaste tacksägelser till alla som på olika sätt hjälpt oss i vårt arbete. Särskilt vill vi tacka följande personer:

Lars-Erik Sjöo och personal vid utbildningsenheten på räddningstjänsten Karlstadsregionen för hjälp med att arrangera de praktiska försöken.

FLEX-styrkan och övriga brandmän på räddningstjänsten Karlstadsregionen som, ibland upprepade gånger, genomförde de praktiska försöken.

Karin Nilsson vid serviceavdelningen på MSB Revinge för hjälp med utrustning.

Sven-Ingmar Granemark, forskningsingenjör på Brandteknik LTH.

Stefan Svensson på MSB Revinge som varit vår handledare.

Ingvar Holmér på Ergonomi och aerosolteknologi LTH för hjälp med standards.

Robert Jönsson och övrig personal på Brandteknik LTH som svarat på frågor om stort och smått.

Kristoffer Norberg på Maskinteknik LTH för teoretisk hjälp om termodynamik

Sammanfattning

Under 1990-talet började räddningstjänsterna i Sverige att använda luftflaskor av kompositmaterial till sina andningsapparater. Den maximala användningstemperaturen för denna typ av flaskor är klart lägre än de omgivningstemperaturer som kan råda vid invändig brandsläckning. Detta arbete har utrett om gastemperaturen i flaskorna vid användning blir högre än den maximalt angivna och om uppvärmningen utgör en fara för användaren.

Författarna har valt att titta på flaskor från tre tillverkare som levererar till den svenska marknaden, MSA, Dräger och Interspiro. Konstruktionssättet skiljer flaskorna åt, MSA och Dräger tillverkar singelflaskor medan Interspiros paket består av två flaskor i dubbelmontage. Drägers flaskor har ett innerhölje av aluminium medan MSA och Interspiro använder termoplast.

Som en del i arbetet har studerats de regler, standarder och tester som måste uppfyllas innan kompositflaskorna får säljas och användas yrkesmässigt i Sverige. Regelverket skrivs av Arbetsmiljöverket som tolkar arbetsmiljölagen. Standarder och tester skrivs av European Committee for Standardization som har till uppgift att ta fram standarder för produkter som skall säljas inom EU. Studien visar att flaskornas ytskikt klarar en betydligt högre temperatur än de maximalt angivna och att denna temperatur avser gastemperaturen i flaskorna.

I rapporten beskrivs teorin bakom de termodynamiska processerna som medför att luftflaskorna både värms upp av omgivningen och kyls av till följd av användning. Beattie-Bridgemans gaslag används för att beräkna tryck och massa i flaskorna då denna erbjuder en högre noggrannhet än den ideala gaslagen som inte tar hänsyn till gasmolekylernas interaktion. De teoretiska resonemangen jämförs därefter med resultat från empiriska mätningar och slutsatserna dras efter invägande av uppgifter från regler och standarder.

Empiriska försök har genomförts där temperaturer och tryck hos flaskorna har mätts under exponeringar som motsvarar användning under invändig brandsläckning. Försöken har utformats för att återspegla en miljö som är vad användaren maximalt kan förväntas klara av om arbetsmiljön ska anses acceptabel. En kort exponering på fem minuter har genomförts enligt standarden Nordtest NT Fire 052 i en inredd container i Karlstad där temperaturen var 250 °C vid 1,2 meters höjd. En längre exponering på 20 minuter och med temperaturen 115 °C anordnades i Brandtekniks laboratorium i Lund.

Samtliga försök har visat på att gastemperaturen i luftflaskorna inte når upp till den maximala användningstemperaturen som respektive tillverkare angett. Detta beror dels på kompositmaterialens värmeledningsförmåga, dels på den avkylning som sker då luft tas ut från flaskorna till följd av användning.

Både de teoretiska resonemangen och de empiriska försöken visar att en kraftig temperatursänkning är att förvänta då det sker ett luftuttag från flaskorna. I vissa fall motverkar luftuttaget helt den uppvärmning som sker och i vissa fall fördröjs tiden tills den maximala användningstemperaturen uppnås. Fördröjningen är dock tillräcklig för att uppvärmningen ska ta längre tid än vad användaren av utrustningen antas klara av vid de aktuella temperaturerna.

Slutsatsen av arbetet är att personen som använder andningsapparaten kommer att behöva avbryta insatsen av andra skäl, exempelvis fysiologiska, innan luftflaskan blir för varm. Bruket av kompositflaskor vid invändig brandsläckning utgör inte, på grund av uppvärmning, en fara för användaren.

Summary

During the 1990's, rescue services in Sweden began using air cylinders made of composite material with their breathing apparatuses. The maximum usage temperature for this kind of cylinders is markedly lower than those ambient temperatures that can prevail at internal fire extinguishing. This project have investigated if the gas temperature in the tanks whilst used reaches a higher level than the maximum temperature specified and if the heating represents a risk to the user

The authors have chosen to investigate cylinders from three manufacturers who delivers to the Swedish market; MSA, Dräger and Interspiro. The construction between the different cylinders differs. MSA and Dräger manufacture single cylinders, whilst the Interspiro package consists of two cylinders in a double mounting. The cylinders by Dräger have an inner coating of aluminium, MSA and Interspiro use thermo plastic instead.

During this project, the laws, regulations, standards and tests that have to be met before the composite cylinders are allowed to be sold and used professionally in Sweden have been studied. The regulations are written by the Swedish Work Environment Authority, who interprets the law of work environment. Standards and tests are decided by the European Committee for Standardization, which is assigned to develop standards for products sold within the EU. This study shows that the surface layer of the cylinders can withstand a considerably higher temperature than the specified maximum temperature and that this temperature concerns the gas temperature within the cylinders

In the report, we describe the theory behind the thermodynamic processes causing the cylinders to both being heated by the surroundings and cooled due to usage. The Beattie-Bridgeman's gas law is used to calculate pressure and mass within the cylinders, as this law offers a higher accuracy than the ideal gas law, which does not take the interaction of the gas molecules into consideration. The theoretical reasoning is thereafter compared with results from empirical measures. The conclusions are drawn after weighing in data from rules and regulations

Empirical trials have been carried out where temperatures and pressures of the cylinders was measured during exposures corresponding to usage during internal fire extinguishing. The experiments have been designed to reflect an environment that is at a maximum of what the user can be expected to sustain within an acceptable work environment. A short exposure of five minutes was accomplished according to the standard Nordtest NT Fire 052 in a furnished container in Karlstad, with a temperature of 250 °C at 1,2 meters height. A longer exposure at 20 minutes with a temperature of 115 °C was set up at the Fire Technical Laboratory in Lund.

All trials have shown that the gas temperature within the cylinders does not reach the maximum usage temperature stated by respective manufacturer. This is partly due to the heat conduction abilities of the composite material, and the cooling that occurs when air is extracted from the cylinders as they are used.

Both the theoretical reasoning and the empirical trials show that a marked decrease in temperature is to be expected when there is an outtake of air from the cylinders. In some cases the air outtake fully counteracts the on-going heating, and in others it delays the time until the maximum usage temperature is reached. The delay is however sufficient for the heating to take a longer time than what the user of the equipment is supposed to manage at the temperatures in question.

The conclusion from this project is that the person using the breathing apparatus will have to discontinue the operation for other reasons, i.e. physiological, before the cylinder gets too hot. The use of composite cylinders at internal fire extinction does not, on the grounds of heating, represent any risk to the user.

Nomenklatur

A_0 , B_0 , a , b och c

$^{\circ}\text{C}$

c_p

c_v

h

K

m_1

m_2

n

P

R

R_u

T

RF

T_1

T_2

u_1

u_2

V

$\bar{v}$

ρ

Ämnesspecifika konstanter i Beattie-Bridgemans
gaslag

Grader Celsius (temperaturenhet)

Värmekapacitet vid konstant tryck [J/kg K]

Värmekapacitet vid konstant volym [J/kg K]

Entalpi [J/kg]

Kelvin (temperaturenhet)

Startmassa [kg]

Slutmassa [kg]

Molmassa [g/mol]

Tryck [Pa] eller [Bar]

Ämnesspecifik gaskonstant [J/mol K]

Universella gaskonstanten [$8,3145 \text{ J/mol K}$]

Temperatur [K] eller [$^{\circ}\text{C}$]

Relativ Luftfuktighet [%]

Starttemperatur [K] eller [$^{\circ}\text{C}$]

Sluttemperatur [K] eller [$^{\circ}\text{C}$]

Inre energi start [J/kg]

Inre energi slut [J/kg]

Volym [m^3] eller [liter, l]

Volymitet [m^3/kmol]

Densitet

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Målgrupp	1
1.4	Innehåll och metod.....	1
1.5	Avgränsningar.....	2
1.6	Disposition och läsanvisning.....	2
2	Beskrivning av andningsskydd och dess användning	3
2.1	Historia	3
2.2	Bärbara andningsskydd med öppet tryckluftssystem.	4
2.2.1	Kompositflaskor.....	4
3	Lagar, regler och testmetoder.....	5
3.1	Arbetsmiljöverket.....	5
3.1.1	AFS 1999:4 Tryckbärande anordningar	5
3.1.2	AFS 2007:7 Rök- och kemdykning	5
3.1.3	AFS 2001:3 Användning av personlig skyddsutrustning.....	6
3.2	European Committee for Standardization (CEN)	6
3.2.1	SS-EN 12245:2009 Gasflaskor - Hellindade flaskor av kompositmaterial	6
3.2.2	SS-EN 137 Andningsskydd - Bärbar tryckluftsapparat med öppet system med helmask	7
3.3	Nordtest NT Fire 052	7
4	Termodynamik, värmeöverföring och gaslagar	9
4.1	System och systemgränser, masstransport.....	9
4.2	Värmetransport	9
4.2.1	Värmetransport genom ledning	9
4.2.2	Värmetransport genom strömning	10
4.2.3	Värmetransport genom strålning	10
4.2.4	Varierande värmetransportsätt under invändig brandsläckning	10
4.2.5	Varierande värmetransport.....	11
4.3	Gaslagar	11
4.4	Värmetransport och tryckökning	12
4.5	Avkylning till följd av trycksänkning	13
5	Försöksuppställning och genomförande	15
5.1	Flaskor	15
5.2	Temperaturmätning	15

5.3	Tryckmätning.....	15
5.4	Försök med stängda flaskor	16
5.5	Försök med luftflöde	16
5.6	Varma miljöer.....	16
5.6.1	Försök i bastu	16
5.6.2	Försök enligt Nordtest NT Fire 052	17
6	Resultat och beräkningar	18
6.1	Inledande försök.....	18
6.2	Försök i bastu	19
6.2.1	Resultat för tester med flaskor från MSA.....	19
6.2.2	Resultat för tester med flaskor från Interspiro	20
6.2.3	Resultat för tester med flaskor från Dräger	21
6.3	Försök i container enligt Nordtest Fire NT 052	21
6.3.1	Resultat för tester med flaskor från MSA.....	23
6.3.2	Resultat för tester med flaskor från Interspiro	24
6.3.3	Resultat för tester med flaskor från Dräger	25
7	Diskussion.....	26
7.1	Övergripande.....	26
7.2	Försök i bastu	27
7.3	Försök i container	27
7.4	Försöksmiljöernas giltighet	28
8	Förslag till fortsatt forskning	29
9	Slutsatser	30
10	Ordlista	31
11	Källor.....	32
	Bilaga A, Använda flaskor och andningsskydd	33
	Bilaga B, Valideringstest av beräkningar med gaslagar.....	34
	Bilaga C, Temperatursänkning till följd av luftuttag.....	35
	Bilaga D, Försök med temperatursänkning till följd av luftuttag	36
	Bilaga E, Försök i bastu, diagram över försök med stängda flaskor.....	37
	Bilaga F, Försök i bastu, diagram över försök med luftuttag	40
	Bilaga G, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med stängda flaskor.....	43
	Bilaga H, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med luftuttag 32 l/min.....	46
	Bilaga I, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med luftuttag 64 l/min	49

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Luftflaskor som inom räddningstjänsten används till andningsapparater omgärdas av ett regelverk bestående av såväl myndighetsdirektiv som EU-normer och tillverkarspecifikationer. De olika bestämmelserna är inte enhetliga och viss begreppsförvirring råder, exempelvis om maximal temperatur avser kortvarig användning eller långtidsförvaring och därmed homogen flasktemperatur. Under hösten 2009 genomfördes ett fåtal enkla försök vid Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB, (Svensson, 2010). Försöken avsåg att undersöka hur tryck och temperatur förändras i och på flaskorna vid användning i varma miljöer. Med varma miljöer avses här invändig brandsläckning eller miljöer där temperaturen och/eller värmestrålningen är så pass hög att skyddsutrustning motsvarande räddningstjänstens larmställ krävs. Resultatet från försöken antyder att den uppvärmning som sker av flaskorna i viss mån kompenseras av den kylande effekt som ges när trycket i flaskorna sänks, till följd av användarens respiration. Tillförlitligheten i resultaten är dock oklar då försöken inte genomfördes i kontrollerad miljö och endast med ett fåtal testserier. Inte heller arbetsbelastningen reglerades utan varierade mellan försöken. MSB ville därför, inom ramen för ett examensarbete, genomföra nya och mer kontrollerade försök på de vanligast förekommande andningsapparaterna. Slutprodukten av projektet är denna rapport.

1.2 Syfte och mål

Målet med examensarbetet är att undersöka hur gastemperaturen i luftflaskor påverkas vid användning i varm miljö. Delar av försöksmetoderna bör i framtiden kunna användas för att utvärdera nya system eller andra typer av undersökningar på gasflaskor. Målet är konkret att undersöka om gastemperaturen i luftflaskor för andningsapparater vid arbete med invändig brandsläckning kan förväntas överstiga den maximala användningstemperaturen. Målet är även att utröna i vilken mån uppvärmningen kompenseras av den inre avkylningen till följd av luftuttag. Syftet är att utifrån resultaten kunna göra en bedömning om uppvärmningen medför fara för användaren.

1.3 Målgrupp

Rapporten riktar sig främst till personer inom eller med anknytning till operativ räddningstjänst eller motsvarande. För de teoretiska resonemangen krävs ibland grundläggande ingenjörskunskaper inom fysik och termodynamik. Större delen av rapporten är skriven med personal inom kommunal räddningstjänst som målgrupp.

1.4 Innehåll och metod

Denna rapport är i huvudsak uppdelad i tre avsnitt. Den första delen innehåller tillämpliga krav och normer för andningsapparater, den andra en teoretisk utredning om de termodynamiska processerna och grundläggande värmeöverföring. Avslutningsvis återfinns huvuddelen av arbetet i en redogörelse för de empiriska undersökningarna av luftflaskor i varma miljöer.

Andningsapparater omfattas av regelverk på såväl nationell som internationell nivå. Arbetsmiljöverket ställer i sina föreskrifter krav på utrustningens utformning och funktion. Inom EU gäller ett antal normer för produktcertifiering. För andra delar av brandmäns skyddsutrustning finns regler och krav som kan vara tillämpliga eller vägledande för bedömningen av bruksförhållanden. Till dessa delar av rapporten har litteraturstudier av lagar, normer och produktinformation samt kontakt med tillverkare använts som metod.

Den teoretiska delen om de termodynamiska processerna och uppvärmningen av cylindrar har förekommit i tidigare delar av brandingenjörsprogrammet, exempelvis kurserna i brandkemi, fysik och termodynamik. För detta arbete har gjorts fördjupade studier i utvalda delar av teorin.

De empiriska försöken har genomförts vid MSB:s försökscontainer i Karlstad under ledning av dr Stefan Svensson. Förstudier och kompletterande försök har skett i Brandtekniks laboratorium på LTH. Mätdata har utvärderats med hjälp av datorprogram, i huvudsak Excel, samt program för mätutrustningen.

1.5 Avgränsningar

För att projektet skulle vara praktiskt och teoretiskt möjligt att genomföra inom tidsramen för ett examensarbete gjordes ett antal avgränsningar. Grunden för arbetet är att luftflaskor till öppna andningsapparater som används i varma miljöer utsätts för en uppvärmning av omgivningen. Rapporten behandlar konsekvenserna av denna uppvärmning med avseende på tryck och temperatur. Hur uppvärmningen sker, exempelvis genom strålning och konvektion, behandlas endast översiktligt. Upprepad exponering för eller långtidseffekter av varma miljöer beaktas inte. Exempel på detta kan vara molekylära förändringar i plaster samt mikrosprickor till följd av upprepad användning. Arbetet förlitar sig helt på leverantörernas och de oberoende testorganens certifiering av kvalitén på flaskorna. Syftet är inte att fastställa flaskornas hållbarhet utan ser till hur temperaturen förändras vid användning. Flaskorna har inte heller utsatts för större påfrestningar än vad som kan anses rimlig att brukaren och övrig skyddsutrustning klarar av.

1.6 Disposition och läsanvisning

Rapporten är i stort uppbyggd enligt dispositionen som visas nedan. Vissa saker beskrivs på dubbla platser i syfte att förenkla läsningen och minska behovet av att bläddra bland sidorna.

2 *Beskrivning av andningsskydd och dess användning.* Kort genomgång av den historiska utvecklingen av andningsapparater samt moderna systems uppbyggnad och funktion.

3 *Lagar, regler och testmetoder.* Redogörelse för de regelverk och standarder som berör användningen av och produkttester för andningsapparater.

4 *Termodynamik, värmeöverföring och gaslagar.* Översiktlig beskrivning av de teoretiska resonemang som arbetet grundar sig på och de beräkningsmetoder som använts.

5 *Försöksuppställning och genomförande.* Hur försöken genomfördes samt vilken utrustning och försöksmiljöer som användes.

6 *Resultat och beräkningar.* Sammanfattning av de viktigaste resultaten jämte teoretiska beräkningar.

7 *Diskussion.* Bedömning av försöksmodellernas och resultatens giltighet.

8 *Förslag till fortsatt forskning.*

9 *Slutsatser.* Tolkning av resultat samt slutsatser dragna från sammanvägning av teori och försök

10 *Ordlista.* Förklaring av ord som används i rapporten.

11 *Källor.* Förteckning över ursprung hos referenser och figurer

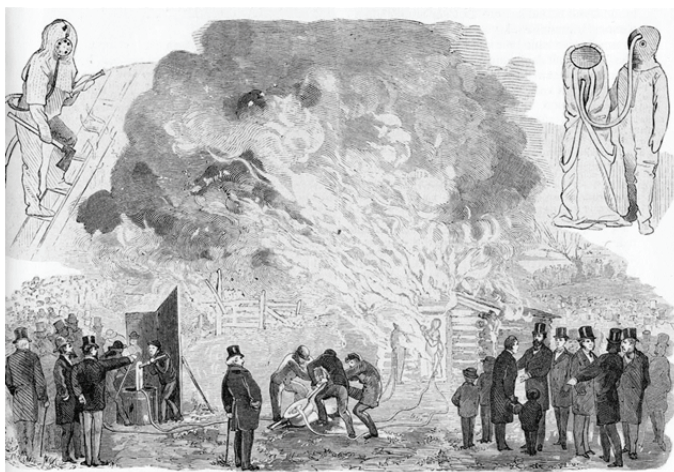
2 Beskrivning av andningsskydd och dess användning

Det finns ett flertal olika typer av andningsskydd anpassade för olika behov och risker i varierande omgivningar. Konstruktionerna sträcker sig från enkla filtermasker för hemmabruk till avancerade dykapparater för militär användning. Priserna varierar lika mycket som den tekniska konstruktionen, från ett tiotal kronor till över en kvarts miljon. Denna rapport är inriktad på bärbara öppna system med tryckluft, ibland kallat SCBA (Self Contained Breathing Apparatus), vilket är den vanligaste varianten som används för räddningstjänst. Priset för ett sådant system är cirka 30 000 SEK. I specialfall används även slutna system med komprimerad syrgas, så kallade rebreathers, men dessa behandlas inte i denna rapport.

2.1 Historia

Då de första heltidsstationerna för räddningstjänsten bildades på 1870-talet användes ingen skyddsutrustning för invändig brandsläckning. En förekommande träningsmetod gick ut på att man skulle lära sig att tåla röken. De nya rekryterna fick under några minuter vistas i ett rökfyllt rum och visa att de kunde vänja sig vid röken. Som vi vet idag ger detta en mer negativ konsekvens då kolmonoxiden påverkar hemoglobinet i blodet vilket minskar blodets förmåga att transportera syre (Brandsjö, 2004).

Den första utrustningen för invändig brandsläckning i Sverige konstruerades av J W Östberg på slutet av 1800-talet. Denna utrustning bestod av en huva som trädde över huvudet och med långa slangar anslöts till en yttre pump som betjänades av tre man, se figur 1. Detta system kallades elddykeriapparat och var inte så användarvänligt. På 1930-talet började det användas en speciell ansiktsmask som filtrerade bort brandröken men med problemet att kolmonoxid fortfarande släpptes igenom. Därefter kom ansiktsmasker med kolfilter som dock hade en begränsad användningstid. Parallellt med ansiktsmaskerna började man på 1920-talet använda apparater med syrgasflaska och kalipatron (Brandsjö, 2004). Kalipatronen rensade på kemisk väg bort koldioxiden från den recirkulerande andningsluften. Systemet bars som en ryggsäck och var en föregångare till dagens slutna system.



Figur 1. Förevisning av elddykeriapparat (Brandsjö, 1896).

Under 1940-talet tog Gustaf Dalén, grundaren till AGA, fram de första tryckluftstuber för räddningstjänstens andningsapparater. Ur AGA-spiro grundades Interspiro som var den enda leverantören till Svensk räddningstjänst fram till 1990-talet. Då började andra världsledande bolag, exempelvis Dräger, Scott och MSA, att ta marknadsandelar. Bland milstolparna i utvecklingen av dagens andningsapparater finns exempelvis system med övertryck som hindrade rök från att tränga in i andningsmasken, 1961, samt flaskor med 300 bars tryck 1965. På 1970-talet kom säkerheten i fokus och det utvecklades reservluftsventiler som varnade när luften började ta slut samt snabbkopplingar som gjorde det möjligt att enkelt koppla in extra luftflaskor till andningsapparaten. 1991 introducerades de första kompositflaskorna vilket avsevärt minskade vikten jämfört med de gamla flaskorna i stål (Interspiro, 2011).

2.2 Bärbara andningsskydd med öppet tryckluftssystem.

Dagens öppna tryckluftssystem för andningsskydd finns i flera varianter och från många tillverkare men de grundläggande principerna och funktionerna är dock lika oavsett modell. Begreppet *öppet system* syftar på att användaren bara andas in en och samma luftvolym en gång, vid utandning släpps luften ut i omgivningen. I ett slutet system återanvänds luften men ny syrgas tillsätts i andningsloopen och koldioxiden rensas bort på kemisk väg i en kalkpatron.

Uppbyggnaden av ett öppet system visas i figur 2, Luften kommer från en flaska, 1, som normalt har ett starttryck på 300 bar och bärs på ryggen i någon form av bärsele. En regulator, 2, som monterats på flaskkranen sänker trycket till cirka 5-10 bar och leder genom slangar luften vidare till andningsmasken, 3. En doseringsventil, 4, släpper till luft vid inandning. Vid utandning släpps luften ut via ett envägsmembran, 5. Som skydd mot att rök ska kunna tränga in i masken håller doseringsventilen hela tiden ett litet övertryck vilket skapar ett flöde ut genom eventuella otätheter.

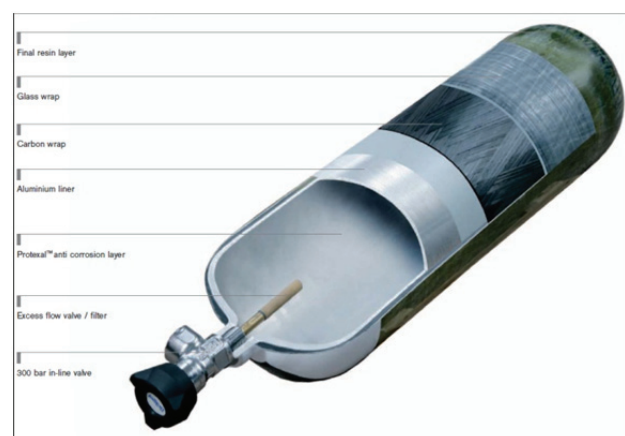


Figur 2. Andningsskydd för räddningstjänst, modell Interspiro.

2.2.1 Kompositflaskor

Kompositflaskor är tillverkade i flera sorters material som kombinerats för att ge önskade egenskaper. För andningsapparaters luftflaskor är dessa egenskaper främst tryck och -slaghållfasthet samt låg vikt. De äldre flaskorna var helt tillverkade i stål vilket medförde att vikten var avsevärt högre. Flaskorna används antingen styckvis eller två och två i paket beroende på önskad volym.

En kompositflaskas generella uppbyggnad visas i figur 3. Innerst i flaskan finns en tät barriär, ofta kallad liner, av plast eller aluminium vars funktion är att hindra gasen från att läcka ut. Utanpå linern finns kolfiber, som har hög draghållfasthet, lindat vilket håller emot trycket och hindrar gasen från att pressa hål på barriären. Därefter följer, på vissa modeller, en lindning av glasfiber som ger slaghållfasthet och skyddar kolfibrerna mot vinkelräta brott. För att stabilisera lindningen läggs i och utanpå fiberlagren en värmebeständig hårdplastblandning (epoxi) som även skyddar mot repor och stötar.



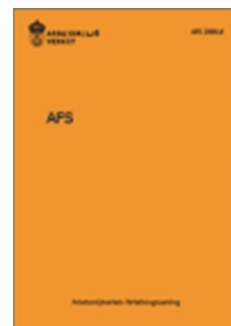
Figur 3. Konstruktion av kompositflaska (Dräger, 2009).

3 Lagar, regler och testmetoder

Arbete i farliga miljöer omfattas av ett stort regelverk som berör allt från utrustning till organisation och arbetsledning. Regelverket består bland annat av svenska författningar och europeiska normer. Utöver dessa bindande regler finns frivilliga certifieringar och testmetoder för kvalitetskontroll av utrustning. Här redogörs kortfattat för de delar som behandlar andningsapparater och i viss mån rökdykning.

3.1 Arbetsmiljöverket

Arbetsmiljöverket bildades 2001 då Yrkesinspektionen och Arbetarskyddsstyrelsen slogs ihop till en myndighet. Den huvudsakliga uppgiften är att tillse efterföljandet av arbetsmiljö- och arbetstidslagstiftningen. Arbetsmiljöverkets mål är att minska riskerna för ohälsa och olycksfall i arbetslivet (Arbetsmiljöverket, 2011). Till sin hjälp har myndigheten arbetsmiljölagen (SFS1997:1160), förkortat AML, samt de egna föreskrifterna som samlas i Arbetsmiljöverkets författningssamling, AFS som kännetecknas av sina orange omslag, se figur 4. Föreskrifterna är juridiskt bindande och ofta av funktionskaraktär, det vill säga att de inte detaljstyr hur arbetet ska ske eller utrustningen konstrueras utan endast föreskriver vilken säkerhetsnivå som ska uppnås. Arbetsmiljöverket publicerar sina föreskrifter i kombination med allmänna råd som är förslag på hur arbetet kan utföras för att leva upp till kraven. För att säkerställa kvaliteten och skyddsförmågan hos utrustningen hänvisas ibland till Europeiska normer och testmetoder. Om ingen norm föreskrivs är det upp till arbetsgivaren att välja den utrustning som anses lämplig. Oavsett val av utrustning så bör denna vara testad enligt någon allmänt erkänd standard för att arbetsgivaren ska kunna hävda ansvarsfrihet i händelse av skada och påföljande rättsprocess.



Figur 4.
Arbetsmiljöverkets
författningssamling

3.1.1 AFS 1999:4 Tryckbärande anordningar

AFS 1999:4 antogs 1999 och är en direkt översättning av Pressure Equipment Directive 97/23/EC som togs i bruk i och med att Sverige blev medlem i EU. Föreskriften reglerar olika typer av tryckbärande konstruktioner, exempelvis ångpannor och utrustning för tryckluft. Andningsapparaters luftflaskor och regulator är bara två av många konstruktioner som behandlas och detaljnivån är därför låg. Föreskriften är främst ägnad till leverantörer och tillverkare vilket medför att större delen behandlar märkning av konstruktioner och olika standarder som produkterna ska testas enligt samt bestämmelser om återkommande kontroller. Några specifika krav och detaljer för andningsapparater återfinns inte utan kraven är mer generella, exempelvis i avsnitt 2.2.3 b ”Hållfastheten hos en tryckbärande anordning skall fastställas genom lämpliga konstruktionsberäkningar”.

3.1.2 AFS 2007:7 Rök- och kemdykning

AFS 2007:7 är arbetsmiljöverkets föreskrift som reglerar rök- och kemdykarinsatser. Föreskriften behandlar främst den organisation och bemanning som krävs vid en insats. En stor del behandlar personalens utbildning och i viss mån vilka fysiska krav som krävs på individen som ska utföra rökdykning. Den personal som deltagit i de empiriska testerna i denna rapport har varit utbildade för att uppfylla kraven i föreskriften. Ett mindre avsnitt berör andningsapparaten och då främst med avseende på skyddsfaktor. Med skyddsfaktor menas hur väl apparaten hindrar luft och föroreningar från omgivningen att komma in i andningsmasken.

3.1.3 AFS 2001:3 Användning av personlig skyddsutrustning

AFS 2001:3 är mycket generell och reglerar arbetsgivarens ansvar att tillgodose att arbetstagaren har den skyddsutrustning som arbetet kräver. Vidare föreskrivs att utrustningen ska skötas och repareras på ett tillförlitligt sätt så att den upprätthåller sin skyddande förmåga. Även arbetstagaren beläggs med krav om att använda utrustningen och följa de instruktioner som tillhandahålls av arbetsgivaren. För andningsapparater finns inga särskilda krav i föreskriften men vissa rekommendationer ges i de allmänna råden.

3.2 European Committee for Standardization (CEN)

Den europeiska kommittén för standardisering, CEN, är en internationell paraplyorganisation med uppgift att upprätta standarder för den europeiska marknaden. Standarderna implementeras i medlemsländernas lagstiftningar så att dessa kan användas på ett konkurrensmässigt sätt inom den europeiska industrin. Syftet är att säkerställa kvalitén och säkerheten på de varor som tillverkas inom Europa och att tillse att produkterna följer den europeiska lagstiftningen. Genom en gemensam kvalitetssäkring gynnas den fria rörligheten av varor inom den Europeiska Unionen (CEN, 2011).

Standarder som ges ut av kommittén betecknas EN och med ett efterföljande nummer samt ibland årtal för senaste revidering, exempelvis EN 12245:2009. Tidigare har standarderna kallats *Europeisk Norm*, en benämning som fortfarande lever kvar i exempelvis äldre författningar som antagits innan Sveriges inträde i EU. Ofta beslutas CEN-standards att gälla som svensk standard och får då tillägget SS, exempelvis SS-EN 137.

3.2.1 SS-EN 12245:2009 Gasflaskor - Hellindade flaskor av kompositmaterial

De kompositflaskor som används i bärbara andningsapparater är hellindade och faller under SS-EN 12245. Standarden implementerades i Sverige i och med inträdet i EU och den senaste gällande revideringen är från 2009. Denna standard beskriver vilka tester flaskorna ska genomgå innan de får säljas på den europeiska marknaden. Testerna utgår i sin tur från ISO-standarder för att säkerställa tillförlitligheten och kvalitén i genomförandet.

Under provningen testas bland annat materialens draghållfasthet, bruttotöjning, viskositet, densitet och kemiska beständighet. Konstruktionen som helhet testas främst med avseende på tryck, slaghållfasthet och tålighet vid värmepåverkan. I SS-EN 12245 ställs även krav på vilka standarder konstruktionsmaterial ska följa samt krav på tillverkningsprocessen. Innan leverans ut på marknaden ska flaskorna märkas med bland annat uppgifter om tillverkare, datumstämpel och arbetstemperaturområde.

Trycktåligheten testas genom upprepade fyllningar av flaskorna och därefter fyllning tills flaskorna går sönder. Provtrycket skall vara 1,5 gånger högre än det normala arbetsstrycket vilket för de flesta flaskor på svenska marknaden innebär en provtryckning upp till 450 bar. Flaskor med icke tidsbestämd livslängd ska fyllas 1200 gånger vid temperaturen 50 °C. Bristningstrycket, även kallat sprängtrycket, ska vara minst två gånger provtrycket, det vill säga minst 900 bar för de flesta flaskor. När flaskorna brister får de inte splittras i fler delar än de konstruerats av. Prov och bristningstryck testas med vattenfyllda flaskor i ett vattenbad. På så sätt minskas risken för skador på omgivningen då vatten är mycket mindre kompressibelt än luft och därmed ger en mindre volymexpansion då kärlet brister.

Slagtåligheten provas med fall från 1,2 meters höjd mot ett hårt underlag. Flaskorna ska falla upprepade gånger och landa på olika sätt varefter trycktåligheten testas med fyllning till bristningstrycket.

Temperaturtåligheten hos flaskorna är i viss mån beroende på den avsedda livslängden. Ett långtidstest ska genomföras med temperaturen 70 ± 5 °C. Flaskor med en livslängd upp till 20 år ska exponeras i 1000 timmar och flaskor med icke tidsbestämd livslängd 2000 timmar. Dessutom skall ett flamtest genomföras

där hela flaskan utsätts för direkt flampåverkan under två minuter. Flamman ska ha en temperatur högre än 590 °C och följa ISO 11439:200, som exempel ges en pölbrand med diesel eller ett träbål. Under exponeringen får inte flaskan brista, den får dock avluftas genom en säkerhetsventil inställd på det maximala arbetstrycket.

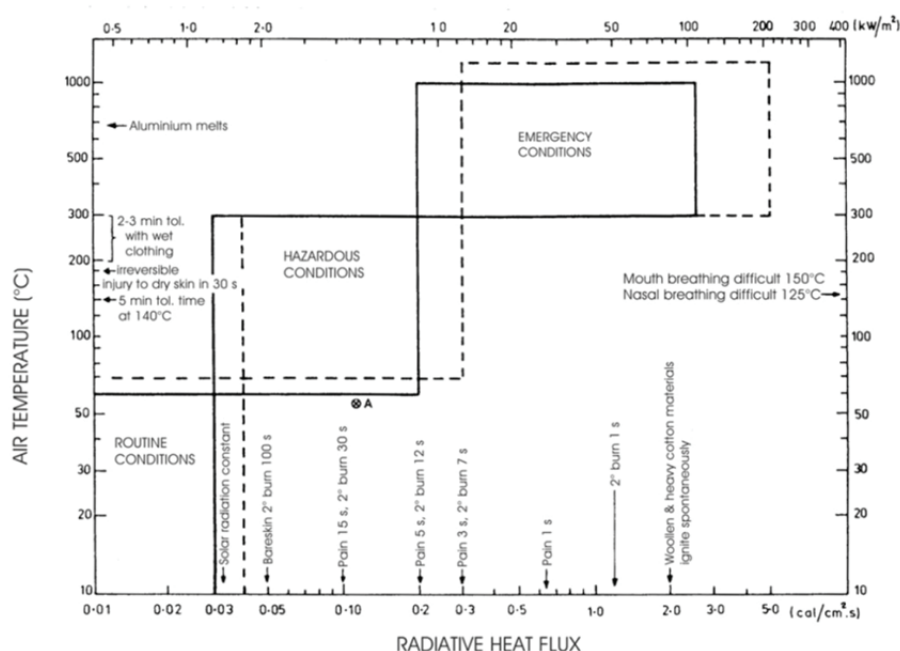
3.2.2 SS-EN 137 Andningsskydd - Bärbar tryckluftsapparat med öppet system med helmask

Denna standard reglerar vilka tester andningsapparater ska genomgå och hur de ska märkas innan de får säljas på den europeiska marknaden. Syftet är att bedöma om komponenterna fungerar tillsammans i ett helt system och inte bara som enskilda delar. Kriterierna är i vissa fall av mer subjektiv karaktär, exempelvis att passformen ska vara lätt att justera och ingen del av utrustningen får sticka ut så de riskerar att fastna. Vissa kriterier är mer precisa såsom att andningsmotståndet inte får överstiga ett visst värde och att systemet ska fungera i temperaturer ner till -30 °C.

För denna rapport är kravet på temperaturtålighet mest väsentligt. Först sker en uppvärmning i en omgivningstemperatur på 90 ± 5 °C i 15 minuter. Därefter ska hela utrustningen utsättas för direktkontakt med en flamma på 950 ± 50 °C i 30 ± 5 sekunder varvid ingen del av utrustningen får fatta eld. Testet kan jämföras med invändig brandsläckning i varm miljö följt av en plötslig exponering för låga vid exempelvis utsläpp av brandfarligt ämne eller eskalerat brandförlopp till följd av övertändning.

3.3 Nordtest NT Fire 052

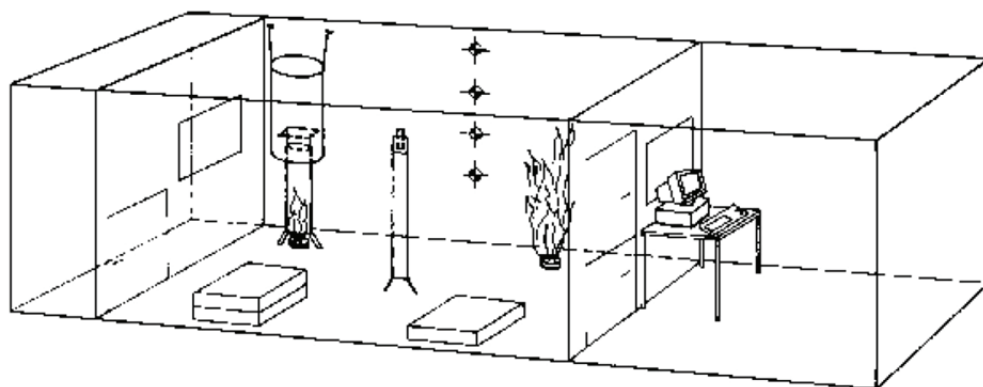
Nordtest NT Fire 052 är utvecklat för att möjliggöra standardiserade försök av utrustningsdelar som kombinerats till en komplett skyddsutrustning för brandbekämpning. Miljön är tänkt att simulera invändig brandsläckning under mycket varma förhållanden och med en relativt kort exponeringstid på fem minuter. Exponeringen motsvarar de övre högra delen på rektangeln "hazardous conditions" i figur 5 och innebär fara, men inte akut risk för liv och hälsa (Hoschke, 1981).



Figur 5. Hur olika kombinationer av temperatur och värmestrålning skapar farliga miljöer.

Arbetet med testmetoden påbörjades i mitten av 1990-talet av dåvarande Räddningsverket med syftet att skapa en standardmetod till funktionstester av larmställ, forskning kring fysisk prestationsförmåga samt kontrollerad utbildning i mycket varm miljö (Räddningsverket, 1995). Många tillverkare är specialiserade på en viss utrustningsdetalj och ibland vill slutkunden kunna kombinera delar av olika märken. Då de olika delarnas testas var för sig enligt specifikt gällande normer, exempelvis SS-EN 659:2004 för handskar, saknades det tidigare en metod för att testa kompletta system. Den nu gällande NT Fire 052 som använts i denna rapport antogs i november 2001.

Försökssuppställningen, se figur 6, i NT Fire 052 är ett testrum med längd $6,5 \pm 0,2$ m, höjd $2,3 \pm 0,1$ m och bredd $2,25 \pm 0,15$ m. Storleken gör att hela anläggningen går att bygga in i en standard 40 fots lastcontainer. I rummet finns två gasbrännare à cirka 100 kW för uppvärmning samt lastpallar som försökspersonen ska stå på under vissa tidsperioder.

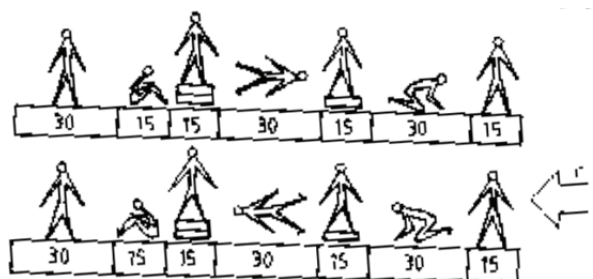


Figur 6. Illustration av försöksrummet i Nordtest NT Fire 052.

Lufttemperaturen på höjden 1,2 meter ska vara 250 ± 10 °C och med en genomsnittlig temperatur under hela testet på 250 ± 5 °C. I takhöjd ska temperaturen på 2,2 meter vara 320 ± 20 °C och genomsnittet 320 ± 10 °C. Värmestrålningen i rummet ska ha en intensitet och genomsnitt på $5,0 \pm 1$ kW/m².

Under testet ska försökspersonen anta olika positioner i rummet, växlande högt och lågt, för att variera temperaturbelastningen. Positionerna, som visas i figur 7, är följande:

- Stå på golvet 30 s
- Sitta ner 15 s
- Stå på två pallar 15 s
- Ligga ner 30 s
- Stå på en pall 15 s
- Knästående 30 s
- Stå på golvet 15 s



Figur 7. Försökspersonens positioner.

Schemat tar 150 sekunder minuter att genomföra och upprepas därefter baklänges vilket ger en total exponeringstid på fem minuter. Den subjektiva uppfattningen från författarna och försökspersonerna som deltog vid försöken enligt Nordtest testet är att den är mycket krävande. En längre exponering skulle vara möjlig men inte acceptabel med avseende på säkerhet och reträtt vid en verklig insats.

4 Termodynamik, värmeöverföring och gaslagar

I detta kapitel beskrivs översiktligt grunderna för de termodynamiska samband som ligger till grund för rapporten. För djupare studier och förklaringar hänvisas till litteraturen där Cengel och Turners bok *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* är lämplig även för den oinvidige. Större delarna av detta kapitel grundar sig i uppgifter från denna bok.

4.1 System och systemgränser, masstransport

För att kunna göra termodynamiska resonemang och analyser måste det som ska analyseras avgränsas i system. Det analyserade systemet kan vara öppet eller slutet beroende på huruvida systemgränsen utgör ett hinder för påverkan eller utbyte med omgivningen. Systemgränsen kan vara en fysik avgränsning, såsom en kärlvägg, eller en tänkt gräns, exempelvis en viss radie runt ett föremål. Ibland används en bakpotatis för att visualisera systemgränser. Potatisens innanmäte är systemet och skalet utgör gräns mot omgivningen (ugnen). Genom skalet kan energi, här i form av värme, komma in till systemet samtidigt som det sker en masstransport ut då avdunstande vattenånga lämnar potatisen, systemet är alltså i princip öppet. Om potatisen sveps in i aluminiumfolie som får utgöra den nya gränsen blir systemet slutet. Värme kan fortfarande passera gränsen men det sker inte längre en masstransport då vattnet hindras av folien.

Vid analysen kartläggs vad som påverkar i systemet medan händelser utanför sammanfattas i generella termer eller ignoreras. Exempelvis kan ett massflöde av luft från en flaska tillåtas flöda ut genom systemgränsen, men vad som händer med luften efter passagen av gränsen beaktas inte. I denna rapport analyseras andningsapparaternas luftflaskor och deras direkta omgivning. Temperaturen och värmestrålningen från omgivningen har beaktats men inte variationer i exempelvis lufttryck och luftfuktighet. Vidare har energi, exempelvis i form av värme, låtits tillföras systemet men utan att själva transportsättet beaktas. Vad som mäts och beaktas närmare får avgöras från fall till fall och bedömas utifrån hur det påverkar det aktuella systemet.

4.2 Värmetransport

Värme är när energi överförs från ett system till ett annat på grund av skillnad i temperatur. Hastigheten på energiöverföringen kallas allmänt för värmetransport. Hur snabbt transporten sker beror dels på hur stor temperaturdifferensen är och dels på vilka förutsättningar som råder. Detta kan, för den insatte, verka uppenbart men det är ändå värt att begrunda dessa grundläggande förutsättningar då de ofta påverkar varandra i komplexa och svårtolkade samband. Värmetransport sker genom ledning, strömning och elektromagnetisk strålning. En nyupphälld kopp med kaffe kommer att avge energi till bordet genom ledning, till luften genom strömning och till föremål längre bort genom strålning. Värmetransporten kommer att gå snabbt i början då kaffet är varmt och avta efterhand som det svalnar. Dessutom kommer energi att lämna systemet genom att vatten avdunstar, energin finns exempelvis bunden i vattenmolekylernas kemiska struktur, men detta är inte värmetransport.

4.2.1 Värmetransport genom ledning

Ledning (även kallat konduktion) är när värmetransporten sker genom ett material och vid direktkontakt mellan två system. Hastigheten beror på systemens materialegenskaper där täta material, såsom metaller, generellt sett är goda värmeledare eftersom atomerna är tätt packade. I exempelvis gaser är avståndet mellan atomerna större och därmed blir ledningen sämre. Många isolerande material består till stor del av luft i en struktur av ett tätare material. Luftcellerna är i bästa fall så pass små att värmetransport genom strömning förhindras. Mineralull, neopren och Thinsulate® är vanliga isoleringsmaterial där luft fångats mellan stenmineral, gummi respektive plast.

Andningsapparaternas luftflaskor är vid normal användning sällan i direktkontakt med varma ytor. Ledning sker mellan bärselen och flaskorna samt om brandmannen lutar sig mot en vägg eller inredning.

Då bärselen oftast har samma starttemperatur som flaskorna blir temperaturdifferensen liten och därmed värmetransporten låg. Ytkontakt med andra material är mindre vanligt och sker ofta kortvarigt men kan ge punktvisa brännskador vid exempelvis kontakt med upphettad metall.

4.2.2 Värmetransport genom strömning

Strömning (även kallat konvektion) är när en gas eller vätska, en så kallad fluid, i rörelse transporterar värme till eller från ett fast material. Fluidets hastighet och täthet avgör hur snabbt transporten sker. Ett vardagligt exempel är en radiator där rumsluften strömmar förbi och värms upp i en relativt långsam process. I en varm dusch är temperaturen ungefär densamma men värmetransporten sker snabbare då vattnet har både högre täthet och hastighet.

Luftflaskorna utsätts hela tiden för strömmande luft i mer eller mindre omfattning. Flaskornas utformning och storlek samt bärselens konstruktion avgör hur stor yta som exponeras. Förhållandena under insatsen kan variera och göra att värmetransporten genom strömning blir mer eller mindre betydelsefull.

4.2.3 Värmetransport genom strålning

Med strålning menas normalt elektromagnetiska vågor. Dessa varierar inom ett brett spektra och är inte beroende av något medium, till skillnad från exempelvis ljud och havsvågor som är vågrörelser i fluider. Röntgenstrålning, synligt ljus och radiosändningar är tre exempel på elektromagnetiska vågrörelser med olika våglängder. Våglängden påverkar hur energirik strålningen är och om den kan passera igenom, absorberas i eller reflekteras bort från det som träffas. Kortare våglängder, exempelvis röntgenstrålning, ger ett högt energiinnehåll och kan passera igenom mjukare material vilket utnyttjas inom sjukvården. Infrarött har sämre genomträngningsförmåga och absorberas till större del i materialet vilket ger en uppvärmning. Vid värmetransport i sammanhang med bränder är strålning i det infraröda våglängdsområdet mest aktuellt och åsyftas fortsättningsvis om inte annat anges.

Hur mycket strålning som sänds ut från en brand och hur mycket som i sin tur träffar ett föremål är starkt beroende av temperaturen och avståndet. Intensiteten, energi per area, ökar med temperaturen upphöjt till fyra. Detta innebär att en fördubbling av brandens temperatur gör att strålningsintensiteten blir 16 gånger högre vilket är förklaringen till bränders stundtals häftiga acceleration. En liten ökning i temperatur ger en kraftig höjning av strålningsintensiteten vilket påskyndar förbränningen och därmed höjer temperaturen ytterligare. Avståndet till branden påverkar intensiteten genom att den avtar med avståndet i kvadrat. En fördubbling av avståndet gör alltså att intensiteten sjunker till en fjärdedel.

Strålningen mot luftflaskorna kan utgöra en betydande del av uppvärmningen. Mest troligt är dock att brandmannens framsida med huvud och axlar är mest utsatt då denne avancerar mot flammorna. Strålningen kan även komma från varma brandgaser och uppvärmda ytor, exempelvis plåtväggar och tak. På grund av den varierande temperaturen och avståndet till branden kommer strålningens inverkan att variera kraftigt under en insats. Vid mätningar på MSBs övningsfält i Revinge uppmättes strålningsintensiteter så högt som 20-34 kW/m² vid försök med övertändningssituationer (Borgström, 2009). Detta faller väl inom ramen för ”emergency conditions” i figur 5 på sidan 7.

4.2.4 Varierande värmetransportsätt under invändig brandsläckning

Hur värmetransporten till luftflaskorna och brandmannen sker kan variera under insats med invändig brandsläckning. Här följer ett kort exempel på insats i en brandutsatt lägenhet. I hallen kan lufttemperaturen vara hög och strömning dominerar. Närmare brandrummet finns ibland lågor i taket vilket ökar strålningens betydelse. Under själva släckningen kanske brandmannen söker skydd bakom ett hörn och får därmed direktkontakt med en vägg vilket ger ledning. Slutligen har en övertrycksfläkt startats vid lägenhetsdörren så reträtten sker i svalare luft men med en högre hastighet och strömningen är återigen dominerande.

4.2.5 Varierande värmetransport.

Värmetransporten påverkas mycket och kan variera kraftig med de förhållanden som råder i omgivningen. Men även om man ser lite närmare så kan flaskans temperatur och användning spela stor roll.

Värmetransporten kommer inte att vara konstant utan variera, även om omgivande förhållanden inte förändras. Grunden för värmetransporten är som tidigare nämnts skillnaden i temperatur mellan två system. Detta medför exempelvis att värmetransporten från omgivningen till ett kallare föremål sker snabbt i början och avtar efterhand som föremålets temperatur närmar sig omgivningens. Om systemen har samma temperatur så kommer ingen energi att överföras, oavsett vindhastigheter och värmeledningsförmåga hos materialen.

4.3 Gaslagar

Många är bekanta med den ideala (även kallat allmänna) gaslagen, se ekvation 1. Om inte direkt så kanske med någon av de anpassade specialvarianter, exempelvis Boyles lag som avser konstant temperatur. Ideala gaslagen ger ett linjärt förhållande mellan tryck, volym, temperatur och gasmängd. En fördubbling av mängden gas i samma volym och vid konstant temperatur ger en fördubbling av trycket i behållaren.

$$PV = nRT \quad \text{ekvation 1}$$

Grunden för ideala gaslagen är ett antagande om att gasens molekyler inte påverkar varandra med elektriska krafter (Jönsson, 2003). Men ju högre trycket blir desto tätare packas molekylerna och börjar interagera. I gasol märks detta genom att gasen blir till vätska, den tryckkondenseras, då trycket i behållaren är cirka 7 bar vid temperaturen 20 °C (Statoil, 2006). Luft, som till 78 procent består av kväve, har mindre elektriska krafter och tryckkondenseras inte vid normal temperatur utan försätter vara i gasfas. Interaktionen mellan molekylerna är dock inte obefintlig utan märks exempelvis genom att trycket vid kompression blir något högre än om sambandet vore linjärt. En dubbling av mängden luft i en behållare leder alltså till ett tryck som är aningen högre än det dubbla. Beroende på tillämpning är avvikelsen ofta försumbar vid relativt måttliga tryck och temperaturer. Men vid tryck över cirka 200 bar kan avvikelsen få betydelse och andra, mer noggranna, gaslagar måste användas. För vardagliga situationer som beräkning av tillgänglig luftvolym i en andningsapparat duger dock den ideala gaslagen alldeles utmärkt.

Beattie-Bridgemans gaslag, se ekvation 2, tar hänsyn till gasmolekylernas interaktion. Det finns mer avancerade gaslagar som ger noggrannare resultat, men dessa kräver i sin tur mer beräkningsarbete och är mest lämpade för datorberäkningar.

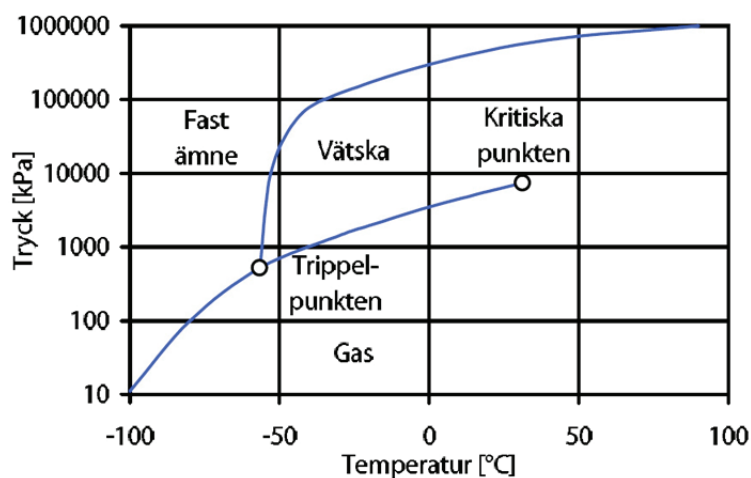
$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \quad \text{ekvation 2}$$

$$\text{Där } A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) \quad \text{och} \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}} \right)$$

A_0 , B_0 , a , b och c är ämnesspecifika konstanter som kompenserar för molekylernas interaktion. Om konstanterna sätts till noll reduceras ekvationen till den ideala gaslagen. Sammanslagningen av konstanterna till termerna A och B är enbart för att förenkla ekvationens utseende och underlätta beräkningarna.

B-B:s gaslag, som använts till många av beräkningarna i detta arbete, ger resultat med små avvikelser från verkliga förhållanden. Vid beräkningar över $0,8\rho_{\text{krit}}$ (som är densiteten vid kritiskt tryck) blir avvikelserna större (Cengel, 1997). Vid kritiskt tryck befinner sig ämnet i ett fastillstånd där det inte går att urskilja om det är gas eller vätska. I figur 8 visas ett fasdiagram för koldioxid och här syns hur kombinationen av tryck och temperatur avgör om koldioxiden är fast, flytande eller gas. Vid högre temperatur än den kritiska punkten kan inte gasen kondenseras till vätska, oavsett hur högt trycket blir. Vid beräkningar med luft

innebär detta i praktiken att noggrannheten med Beattie-Bridgemans gaslag är hög upp till cirka 220 bar för att därefter sakta avta.



Figur 8. Fasdiagram för koldioxid (Särdqvist, 2006).

I detta arbete har både den ideala gaslagen och Beattie-Bridgemans ekvation används då de i förhållande till övriga osäkerheter, exempelvis precisionen hos mätinstrument, ger tillräckligt noggranna beräkningar.

4.4 Värmetransport och tryckökning

I både den ideala och Beattie-Bridgemans gaslag finns temperaturen, T , med som en faktor som påverkar trycket. När gasens temperatur höjs så stiger trycket i en sluten behållare. Om gasvolymens massa är känd kan man med hjälp av sluttrycket beräkna temperaturökningen och därefter den mängd energi som absorberats från omgivningen. Resultaten kan användas för att jämföra olika flaskors värmeledningsförmåga och jämföra med den förväntade avkylningen till följd av trycksänkning

För att kontrollera giltigheten hos de teoretiska modellerna inom de aktuella tryck- och temperaturområdena genomfördes ett valideringstest. En flaska som acklimatiserats ett dygn i klimatrums sköljdes växlande med varmt samt kallt vatten och trycket mättes då flaskans temperatur var homogen. Med utgångspunkt i startvärdena beräknades gasens teoretiska temperatur med hjälp av gaslagarna. Testet redovisas närmare i bilaga B och resultaten visas i tabell 1.

Tabell 1. Uppmätta och beräknade temperaturer vid test av gaslagarna.

Tryck [bar]	Temperaturer i Kelvin enligt:		
	Termoelement	Beattie-Bridgeman	Ideala gaslagen
209,9	293,9	-	-
200,4	284,5	284,7	280,6
245,6	328,5	328,4	343,8
200,0	284,1	284,3	280,0
209,6	293,2	293,6	293,4

I tabellen syns tydligt att Beattie-Bridgemans gaslag ger resultat som stämmer väl överrens med vad mätinstrumenten visar. Den ideala är något sämre vid rumstemperatur och kallt vatten, vid varmt vatten blir skillnaden större, som mest cirka 15 grader. Detta beror på att den ideala gaslagens inte beaktar molekylernas interaktion vid högre tryck och temperatur. Jämförelsen av temperaturerna är i Kelvin, som är en absolut temperaturskala, och visar på cirka fem procents avvikelse för den ideala gaslagen vid den högsta temperaturen.

4.5 Avkylning till följd av trycksänkning

En vardaglig observation inom räddningstjänsten är att när en luftflaska fylls så blir den varmare. När kranen stängs och flaskan fått svalna till rumstemperatur så har trycket i den sjunkit, ibland så pass mycket att den måste efterfyllas innan användning. Detta beror på sambandet mellan tryck och temperatur och kan enkelt räknas ut med ideala gaslagen. Som tumregel kan användas att en grads skillnad i temperatur ger cirka en bars skillnad i tryck. På liknande sätt sker en avkylning om trycket i flaskan sänks då luften används i andningsapparaten, men med skillnaden att gasmängden i flaskan inte längre är konstant. Då tryck och temperaturen korresponderar kommer slutvärdena för båda dessa att vara okända, även om man vet mängden luft som lämnat flaskan. Om systemgränsen sätts till andningsapparaten så kommer massa och energi att lämna systemet då användaren andas ut luft i omgivningen. Samtidigt sker en värmetransport till den avkylda flaskan från omgivningen, till följd av skillnaden i temperatur. Flödena över systemgränsen kommer att variera med tiden vilket gör analysen än mer komplicerad. Dock så kommer även yttre faktorer som rumstemperatur, vindhastigheter och variationer mellan olika flaskor att spela stor roll vilket minskar behållningen av alltför noggranna beräkningar.

Här följer ett förenklat resonemang om hur gastemperaturen sänks till följd av luftuttag i en flaskan som inte tillförs någon värme eller massa och som inte uträttar något arbete. Energibalansen för systemet blir enligt ekvation 3. De ingående storheterna förklaras närmare i stycket nedan.

$$(m_2 - m_1)h + m_1u_1 - m_2u_2 = 0 \quad \text{ekvation 3}$$

Hur mycket energi som krävs för att höja temperaturen hos ett ämne kallas allmänt värmekapacitet, c , och har ofta enheten kJ/kg K. Hos gaser är energimängden starkt beroende på om gasen tillåts variera i volym under uppvärmningen och trycket är konstant, c_p , eller om volymen är konstant och trycket förändras, c_v . Om gasen är ideal kan värmekapaciteten $c_{p/v}$ antas till ett medelvärde c_{avg} . För luft varierar värmekapaciteten i det närmaste linjärt inom temperaturområden på över hundra grader (Çengel, 2008) och kan därför i de begränsade temperatur- och tryckområden som behandlas i denna rapport antas vara ideal. I ekvation 3 används gasens entalpi, h , och inre energi, u , vilka i sin tur beror på c_p respektive c_v och därmed kan även dessa ansättas som medelvärden.

För ideala gaser är entalpin $h = c_{p\ avg} \cdot T$ samt den inre energin $u = c_{v\ avg} \cdot T$

Entalpin varierar under processen och antas till ett medelvärde enligt: $h_{avg} = c_{p\ avg} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)$

Medelvärdet för $c_{p/v}$ är beroende av sluttemperaturen T_2 vilken är okänd och därför måste uppskattas. Om det uppskattade värdet skiljer sig avsevärt från slutresultatet måste beräkningen itereras, det vill säga göras om med en ny uppskattning och beräkning tills resultatet är godtagbart.

Om flödet ut ur flaskan är känt kan mängden luft som lämnat systemet beräknas och subtraheras från startmassan m_1 för att ge slutmassan m_2 . Den inre energin för starttemperaturen kan hämtas från tabeller, alternativt beräknas med sambandet ovan. Ekvation 3 får nu följande utseende.

$$(m_2 - m_1)c_{p\ avg} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) + m_1u_1 - m_2c_{v\ avg}T_2 = 0 \quad \text{ekvation 4}$$

Den enda okända i ekvation 4 är nu gasens sluttemperatur T_2 som kan beräknas och jämföras med den temperatur som uppskattats för att beräkna den genomsnittliga entalpin.

För en normalstor luftflaska fylld till 200 bar vid rumstemperatur och med volymen 6,8 liter medför ett 150 liters luftuttag en teoretisk temperatursänkning av gasen på cirka 15 grader, se bilaga C. Om uttaget sker snabbt kan temperaturskillnad kännas med händerna på flaskans utsida. Dock har då gasen redan börjat värmas upp av kärlets väggar och temperatursänkningen på ytan blir mindre än den initiala hos gasen. Vid större luftuttag blir avkylningen så pass stor att kondens och rimfrost kan bildas på flaskan, vilket ibland kan observeras vid användning i varm miljö.

För att kontrollera giltigheten i resonemanget genomfördes ett försök med en liten 1,5 liters flaska i aluminium. Utifrån tryck och temperaturmätningar kunde gasvolymens startmassa beräknas med Beattie-Bridgemans gaslag. Därefter placerades flaskan på en våg och tömdes snabbt på cirka 2/3 delar av luftmängden. Utifrån sluttrycket och flaskans viktnedgång kunde temperaturen beräknas med Beattie-Bridgemans gaslag och jämföras med den teoretiskt beräknade temperaturen enligt resonemanget ovan. Försöket, som redovisas närmare i bilaga D, visar att de teoretiska beräkningarna stämmer väl överrens med verkliga förhållanden. Den teoretiskt beräknade temperaturen skiljde sig endast en grad från den som beräknats med Beattie-Bridgemans gaslag utifrån uppmätt tryck och kvarvarande gasmängd, se tabell 2. Det kunde även observeras att gasen i flaskan mycket snabbt tog upp energi från kärlets väggar. Efter att uttaget avslutats steg trycket i flaskan med cirka 20 bar inom loppet av några sekunder.

Tabell 2. Start och beräknade temperaturer.

	Temperatur [K]
Start	293.1
Teoretisk beräkning	215.0
Beattie-Bridgeman	214.0

Om trycket och mängden luft i flaskan är känt blir beräkningen av gasens temperatur mycket enklare. De kända parametrarna kan då användas direkt i exempelvis Beattie-Bridgemans gaslag.

Även för den trycksänkning som sker i andningsapparatens regulator och doseringsventil är beräkningarna enklare. Om temperaturen hos en viss mängd luft ska analyseras så är luftmassan konstant och den teoretiska temperaturen vid de olika trycksänkningarna kan beräknas med ideala gaslagen. Det måste dock beaktas att gasen kommer att absorbera energi vid regulatorn och vid passage genom slangarna. Framförallt slangarna ger en lång och smal passage för luften och kan leda in värme från den omgivande luften. I denna rapport studeras inte temperaturen på den luft som användaren andas in från doseringsventilen, arbetet är fokuserat på flaskornas temperatur.

5 Försöksuppställning och genomförande

Här beskrivs kortfattat försöksuppställningen och hur de empiriska mätningarna genomfördes.

5.1 Flaskor

I detta arbete har flaskor från Dräger och MSA med 6,8 liters volym samt Interspiros flaskpaket med 2 x 3,4 liter granskats. Flaskorna specificeras närmare i bilaga A. Den totala gasvolymen är samma men vissa skillnader finns i färg, form och uppbyggnad. Interspiros flaskor har, till följd av dubbelmontaget, en större yta än de övriga och gummihättor på toppen vilket ger viss isolering. Drägers flaska har ett innerhölje av aluminium vilket kan göra att kärlväggarna har en högre värmekonduktivitet än de av plast. MSA har stora gummihättor, som är tjockare än Interspiros, på topp och botten vilket ger extra isolering.

5.2 Temperaturmätning

För att mäta och registrera temperatur användes termoelement och dataloggar. Termoelementen var av typ KX, modell Pentronic G/G-30-KK och avsedda för en maximal temperatur på 510 °C med avseende på trådarnas isolering. Dataloggarna var modell Testo 177-T4, se figur 9, inställda på registrering av mätvärde var tredje sekund. För tömning av loggarna användes datorprogrammet Testo ComSoft 3 Basic version 3.4.



Figur 9. Testo temperaturlogg.



Figur 10. Placering av termoelement.

Termoelementen fästes på flaskorna med värmebeständig glasfibertejp (3M "Scotch Electrical tape"). Placeringen visade sig vid förtester inte påverka resultatet signifikant då flaskorna blev relativt jämnvarma, detta gällde främst de isolerade mätpunkterna. Avståndet från flaskkranen var 23 cm för isolerade termoelement och 21 cm för oisolerade, se figur 10. De isolerade elementen göts in med 4 mm silikon (Bostic silicone universal) och täcktes med två lager 7 mm neopren med slutna celler. Utanpå neoprenet placerades aluminiumfolie som strålningsskärm.

5.3 Tryckmätning

Till tryckmätningar användes en digital manometer från Keller, se figur 11, med mätområde 0 till 300 bar. Modellen var LEO 2 med en noggrannhet på <0,3 bar vid rumstemperatur.



Figur 11. Digital manometer.

5.4 Försök med stängda flaskor

För att mäta hur mycket värme som gasen i flaskorna absorberar genomfördes test där flaskorna låts ligga stängda i varma miljöer. Trycket mättes vid exponeringens början och slut samt varannan minut i de fall manometerns temperaturtålighet medgav användning i försöksrummet. Med resultatet från mätningarna kunde gasens temperatur och energiupptag beräknas med hjälp av gaslagarna som beskrivs i avsnitt 4.3.

5.5 Försök med luftflöde

För att simulera användning av flaskorna kopplades regulatorn via slang till en reglerventil och vidare till en flödesmätare av modell KDG Flowmeters 2000. Flödesmätaren kalibrerades genom kontinuerlig vägning av en flaska till luftflödet 37,8 g/min vid 24,5 °C vilket motsvarar 31,8 l/min. Flödet motsvarar ungefärligen en persons förbrukning vid låg arbetsbelastning.

5.6 Varma miljöer

Flaskorna testades under två temperatur- och tidsförhållanden som anses representera invändig brandsläckning. Den varmare miljön i container följde i stort Nordtest NT Fire 052 som beskrivs närmare i avsnitt 3.3. I testet vistas en försöksperson under fem minuter i en miljö där rumstemperaturen är 250 °C i midjehöjd. Tester med svalare miljö, cirka 115 °C, men med längre exponeringstid, 20 minuter, anordnades i bastun vid Avdelningen för brandteknik och riskhantering vid Lunds universitet. Respektive försök beskrivs närmare nedan.

5.6.1 Försök i bastu

Till långtidsexponering vid lägre temperatur användes bastun vid Avdelningen för brandteknik och riskhantering vid Lunds universitet. Värmeaggregatet kördes på full effekt vilket efter cirka sex timmar gav en stabil temperatur på cirka 115 °C och en luftfuktighet på mellan 10 och 15 % RF. Temperaturen var tänkt att motsvara en räddningsinsats i varm miljö men utan direkt närhet till brandhärden. Förhållandena i bastun var stabilare än i containern och flaskorna testades stillaliggandes. Mätresultaten blev jämnare då det inte heller fanns någon inverkan från försökspersonernas agerande och eventuella långdskillnader.

Innan testen förvarades luftflaskorna minst 24 timmar i ett klimatrum med lufttemperaturen 20 °C och luftfuktigheten 65 % RF. Flaskorna monterades på respektive bärsele och placerades med flaskan uppåt på en stapel av lättbetongelement, se figur 12.

Samtliga flaskor kopplades vid försöken till en och samma regulator med manometer och reglerventil som ledde vidare till flödesmätaren. Flaskorna vägdes innan och efter försöken och trycket avlästes varannan minut under exponeringen. När luften slogs på åtgick momentant 29 gram för att fylla systemet(regulator, högtrycksslang och andningsventil) därefter var luftflödet cirka 35 gram/minut vilket motsvarar en respiration av cirka 30 liter/minut.



Figur 12. Flaska med inkopplad regulator, manometer och reglerventil.

5.6.2 Försök enligt Nordtest NT Fire 052

För att simulera invändig brandsläckning användes försöksanläggningen hos Räddningstjänsten Karlstadsregionens övningsfält i Karlstad, se figur 13. Anläggningen är från mitten av 90-talet och byggdes för att testa RB90 och utveckla den standard som senare blev Nordtest NT Fire 052. Under de senare åren har försöksanläggningen mest använts till träning och utbildning av brandmän, både från Karlstadsregionen och tillresta gäster från andra kommuner. Exponeringen för den varma miljön har då använts för att ge en värmebelastning innan mer konditionskrävande sökövningar med kall rök i ett angränsande övningshus.



Figur 13. Försöksanläggningen utifrån.

Containerns utformning följer i stort standarden men värmerummet är något mindre än föreskrivet. Då anläggningen under lång tid inte har använts till försöksverksamhet har många ur personalen hunnit gå i pension eller bytt arbetsplats. Detta har medfört att underhållet var eftersatt och att vissa kunskaper om anläggningens handhavande gått förlorade. Exempelvis saknades strålningsmätare och bra möjligheter att reglera temperaturen. Anläggningens utrustning för temperaturmätning kompletterades med termoelement och dataloggar. Efter viss inkörning ansågs temperaturen vara så pass jämn att meningsfulla försök kunde genomföras, även om dessa inte till fullo uppfyllde standarden.

Under testerna vistades försökspersonerna under fem minuter i ett rum, se figur 14, där temperaturen var cirka 250 °C på höjden 1,2 meter och 320 °C i taknivå. Under testet intar försökspersonen ett antal positioner, växelvis högt och lågt, för att variera värmebelastningen och utrustningens passform. Den sittande positionen ersattes med knästående då växlingen annars tog för lång tid.

Uttaget av luft från flaskorna skedde med respektive tillverkarens regulatorenhet som genom avkapad lågtrycksslang kopplats till flödesmätaren. När luften slogs på åtgick momentant 29 gram för att fylla systemet, därefter antogs luftflödet vara 37,8 gram/minut vilket motsvarar en respiration av cirka 32 liter/minut. För varje flaskmodell genomfördes även ett försök med det dubbla luftflödet som är en mer rimlig förbrukning under en insats. Testflaskan bars då på ryggen i bärsele, som vid normal användning, medan testpersonerna andades ur ett separat handburet andningsskydd som var placerat på golvet, se figur 14.



Figur 14 .Försöksrummet, försökspersonens luftpaket till vänster

Vid containerförsöken fanns ingen tillgång till klimatrums varför luftflaskornas starttemperatur varierade. Även rumstemperaturen utanför värmerummet varierade vilket medförde att flödesregleringen skedde med olika temperaturer på luften. Därmed finns även vissa variationer i hur mycket luft som tagits ut från respektive flaskas. Den höga temperaturen i försöksrummet medförde att tryckmätningar under exponeringen inte kunde genomföras på grund av manometerns begränsade temperaturtålighet. Det var inte heller möjligt att mäta sluttrycket vid flödesförsöken då den varma utrustningen tog för lång tid att montera isär.

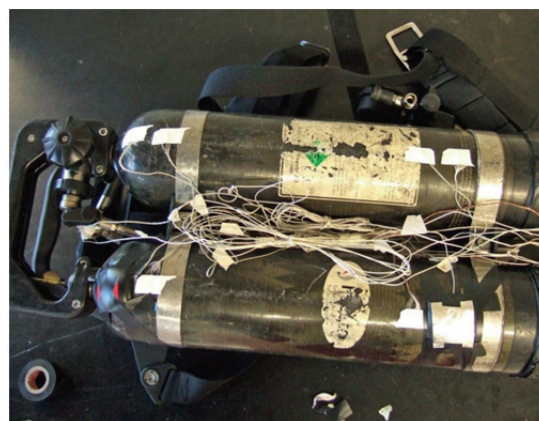
6 Resultat och beräkningar

I detta kapitel redovisas resultat och beräkningar från de empiriska försöken. Först finns resultaten från de inledande försöken, därefter för långtidsexponering i bastu och slutligen från försöken i container. Temperaturerna som visas är de som anses nödvändiga för fortsatt slutsats och diskussion senare i rapporten. I bilaga E till I redovisas varje försök för sig och med fler mätvärden. Flöden benämns av pedagogiska skäl med liter per minut men beräkningarna har genomförts med massflödet.

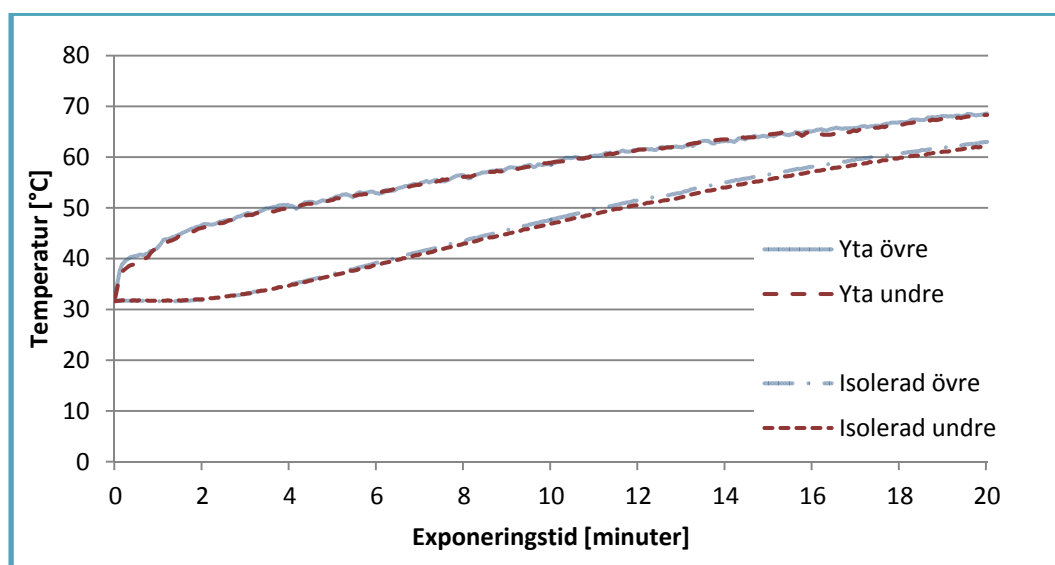
6.1 Inledande försök

För att avgöra hur termoelementens placering påverkade resultatet genomfördes inledande tester.

Försökupställningen var i stort densamma som senare användes vid försök i bastun. I figur 15 visas ett flaskpaket från Interspiro där fyra termoelementen placerats på övre och undre delen av de två flaskorna i paketet. Resultatet från försöket visas i figur 16, där det syns en mycket liten skillnad i temperatur mellan flaskpaketets övre och undre del. Utifrån försöken drogs slutsatsen att termoelementens placering spelar en mindre roll om flaskan är placerad horisontellt.



Figur 15. Flaska med åtta termoelement.



Figur 16. Diagrammet visar att termoelementens placering på flaskan ger en mycket liten skillnad i temperatur.

Vid försök då flaskans position varierade märktes skillnader i temperaturen hos de oisolerade termoelementen. Ytemperaturen växlade i takt med temperaturen hos den omgivande luften men var lägre eftersom det skedde en avkylning från flaskan. De isolerade termoelementen som var menade att mäta gastemperaturen i flaskan uppvisade dock inte denna variation vid växling av position. I flaskorna kunde luften strömma fritt och temperaturen antogs därför vara homogen i gasmassan.

6.2 Försök i bastu

Bastun erbjöd den mest stabila och kontrollerade miljön vid försöken, både med avseende på omgivningstemperatur och för avläsning av mätvärden. Temperaturloggarna programmerades för att registrera mätvärden var tredje sekund medan trycket avlästes varannan minut. Gasens temperatur beräknades därefter med Beattie-Bridgemans gaslag. I bilagorna E och F visas både beräknade och loggade värden i samma diagram för respektive mätning. Diagrammen har ritats med det loggade värde som registrerats vid tidpunkten för tryckavläsningen och är därmed uppbyggda av värden från varannan minut.

Sluttemperaturerna för samtliga försök redovisas i tabell 3. Ingen flaska fick en gastemperatur som var högre än 60 °C även om flaskan var stängd, diagram redovisas i bilaga E. Vidare syns tydligt att ett luftuttag gav en lägre temperatur och som i MSA:s fall var lägre än starttemperaturen (20 °C) trots värmeförsel från omgivningen, diagram redovisas nedan i avsnitt 6.2.1-3 samt i bilaga F.

Tabell 3. Gasmassans sluttemperaturer i flaskorna vid försök med 20 minuters exponeringstid i bastu.

	MSA		Interspiro		Dräger	
	1	2	1	2	1	2
Flöde 30 l/min	19,0	19,5	35,0	35,2	38,4	39,1
Stängd flaska	47,6	48,1	56,4	56,2	58,3	59,2

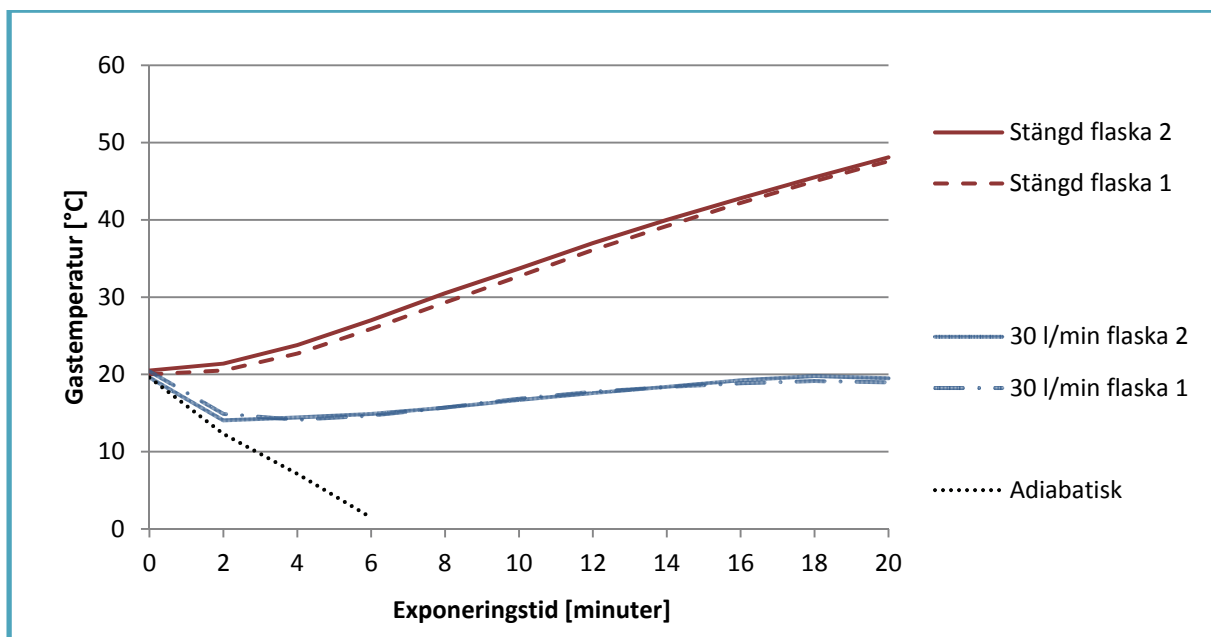
I följande avsnitt visas resultaten från mätningar vid luftuttag med ett diagram för varje märke och mätningar på två flaskor, totalt fyra uppmätta gastemperaturer per diagram. Lufttemperaturerna bygger på beräkningar utifrån tryckavläsning. Dessutom finns i varje diagram en linje som visar den teoretiska gastemperaturen vid luftuttag och som har beräknats enligt resonemangen i avsnitt 4.5. Den teoretiskt beräknade linjen visar den adiabatiska gastemperaturen vid luftuttag. Med adiabatisk menas här att det inte sker någon uppvärmning av gasen från omgivningen, inte ens från flaskans väggar. Massflödet har beräknats utifrån vägning av flaskorna och till de första två minuterna har lagts det momentana luftuttaget på 29 gram som åtgick för att trycksätta systemet. I vissa fall är mätresultaten så pass lika att de är svåra att skilja åt och varje försök redovisas därför närmare i bilaga F. Den högsta gastemperaturen erhöles för samtliga märken då flaskan var stängd och luftmängden i flaskan var densamma under hela exponeringen. Temperaturen blev lägre då luft togs ut från flaskan vilket syns på de mellersta linjerna. Den adiabatiska temperaturen visas bara för de första sex minuterna, därefter blir temperaturen under noll och skulle om linjen ritats under hela exponeringen slutat på cirka -38 °C. Detta har inte ansetts nödvändigt utan skulle endast försvåra avläsningen av diagrammen.

I samtliga försök syns hur temperaturen ökar snabbast i början när flaskan är kall och temperaturdifferensen till omgivningen är som störst. Efterhand som flaskan värms upp avtar värmeupptaget och temperaturkurvan börjar plana ut.

6.2.1 Resultat för tester med flaskor från MSA

MSA var det märke där gastemperaturen i flaskan generellt var lägst och den avkylande effekten syns tydligast, se figur 17. De första två minuterna var uppvärmningen så pass låg att linjen för gastemperaturen vid uttag av luft i det närmaste följer den adiabatiska linjen.

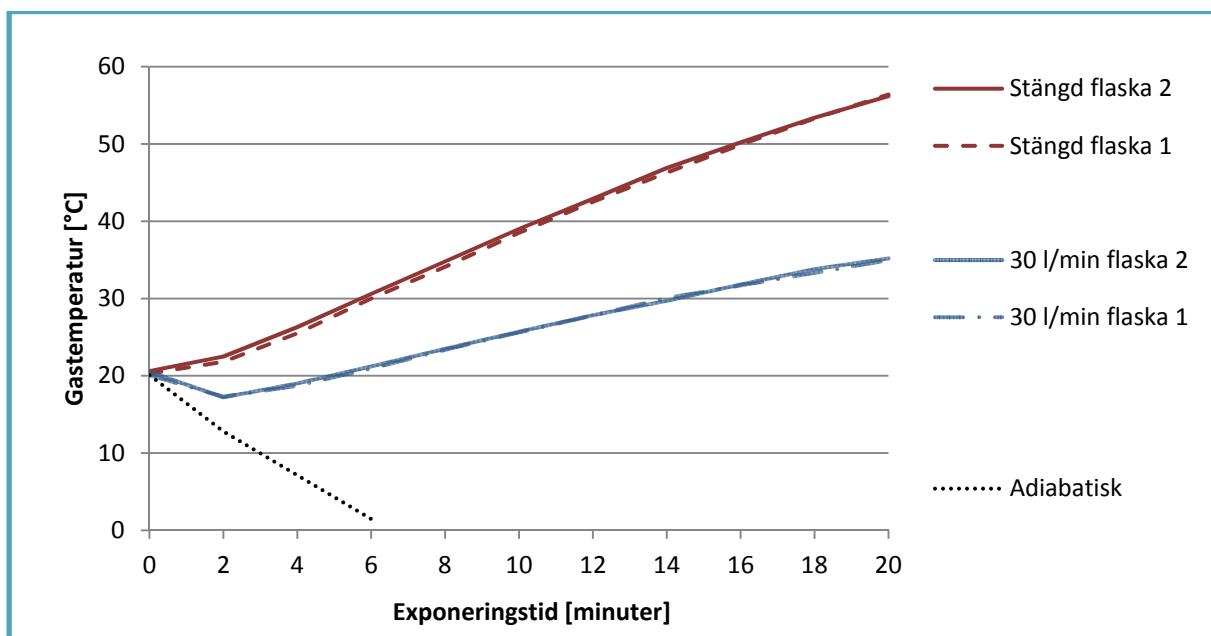
Därefter sker en svag uppvärmning och sluttemperaturen blev strax under 20 °C. Även om flaskorna var stängda blev uppvärmningen låg och sluttemperaturen nådde inte upp över 50 °C.



Figur 17. Diagrammet visar mätningar från fyra olika försök med MSA flaskor, där gastemperaturen har beräknas utifrån tryckavläsning, samt den framtagna adiabatiska temperaturen som enbart bygger på teoretiska beräkningar.

6.2.2 Resultat för tester med flaskor från Interspiro

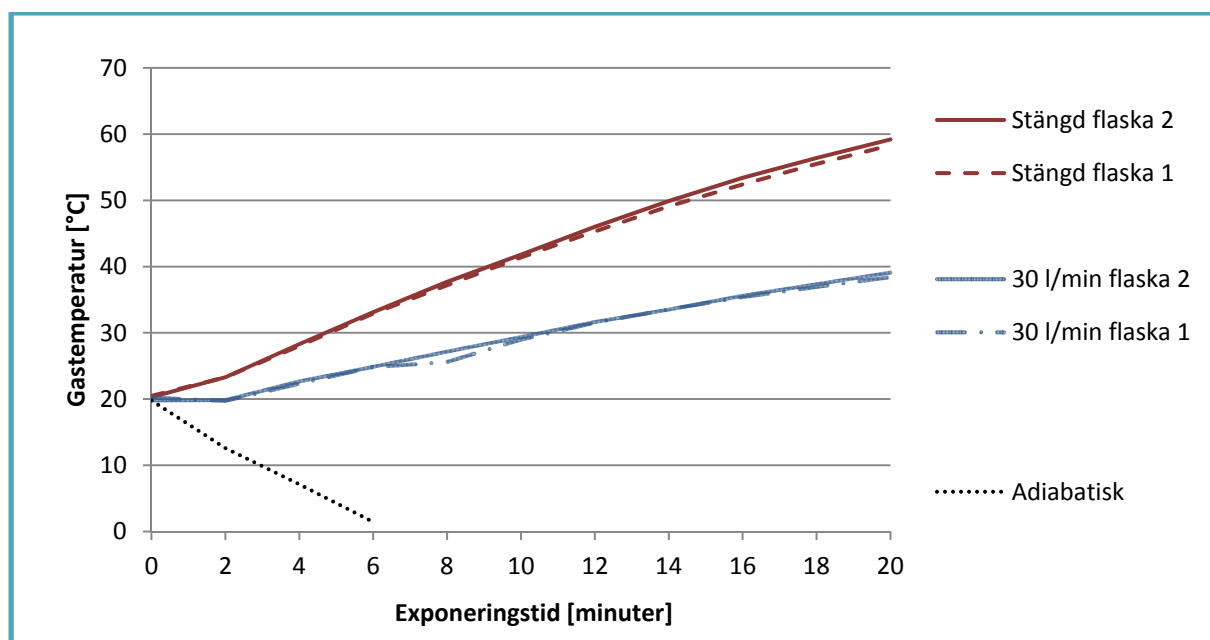
Interspiros flaskor fick vid luftuttag en maximal gastemperatur i flaskan på 35 °C och med stängd flaska 56 °C se figur 18. Avvikelsen från den adiabatiska linjen är tydlig men det tar ändå cirka fem minuter innan temperaturen överstiger 20 °C.



Figur 18. Diagrammet visar mätningar från fyra olika försök med Interspiro flaskor, där gastemperaturen har beräknas utifrån tryckavläsning, samt den framtagna adiabatiska temperaturen som enbart bygger på teoretiska beräkningar.

6.2.3 Resultat för tester med flaskor från Dräger

Drägers flaskor ledde värme bättre än de övriga och fick därmed en högre gastemperatur i flaskan och i vissa fall lägre ytemperatur. Sluttemperaturen i flaskorna var strax under 40 °C vid luftuttag och nära 60 °C med stängda flaskor, se figur 19. Avvikelsen från den adiabatiska temperaturen är markant och temperaturen var runt 20 °C redan efter två minuter.



Figur 19. Diagrammet visar mätningar från fyra olika försök med Dräger flaskor, där gastemperaturen har beräknats utifrån tryckavläsning, samt den framtagna adiabatiska temperaturen som enbart bygger på teoretiska beräkningar.

6.3 Försök i container enligt Nordtest Fire NT 052

De försök som genomfördes i container var tänkta att följa standarden *Nordtest NT FIRE 052* vilken beskrivs närmare i avsnitt 3.3. Ett antal avvikelser gjorde resultaten mindre tydliga än i bastuförsöken men samma tendenser kan skönjas. Avvikelserna, som analyseras närmare i kapitel 7, var bland annat i form av mindre jämn omgivningstemperatur och olika längd hos försökspersonerna. Även avsaknaden av ett klimatrums påverkade resultatet då starttemperaturerna varierade mellan cirka 10 och 20 °C.

Temperaturloggarna programmerades för att registrera mätvärden var tredje sekund och de temperaturer som visas i följande diagram är från de isolerade termoelementen. De isolerade termoelementen mätte inte den direkta gastemperaturen då de var placerade på flaskans utsida. Således utsattes de för både en snabb uppvärmning utifrån och en långsammare uppvärmning/avkylning inifrån. Vid jämförelse mellan termoelementen och vad som beräknats med hjälp av trycket så visar termoelementen generellt sett en lägre sluttemperatur. Detta antyder att dessa mätpunkter var isolerade ”från båda håll” och att gastemperaturen var något högre än vad som registrerats. T ex. vid försöken med stängda flaskor är temperaturdifferensen ca 5 °C.

I tabell 4 visas start- och sluttemperaturerna samt den absorberade energin vid mätningar med stängda flaskor. Flaskornas tryck mättes före och direkt efter exponeringen och gasens temperatur beräknades därefter med Beattie-Bridgemans gaslag. Temperaturerna skiljer sig mer åt mellan flaskor av samma märke än vid försök i bastu men är i samtliga fall lägre än 50 °C och de temperaturer som uppnåddes i bastun. I tabell 4 syns även att i de flaskor som hade en lägre starttemperatur absorberade gasen totalt sett mer energi även om de inte nådde lika högt i sluttemperatur. Detta beror på den större temperaturdifferensen mot omgivningen vilket främjar värmetransporten in i flaskan, se även avsnitt 4.2.5.

Tabell 4. Flaskornas start- och sluttemperaturer samt upptagen energi vid försök i container med stängda flaskor.

Flaska	T _{start} [°C]	T _{slut} [°C]	Upptagen energi [kJ]
Interspiro 1	17,2	42,5	29,8
Interspiro 2¹	18,7	46,2	32,3
MSA 1	17,1	31,8	17,2
MSA 2	13,8	32,0	22,0
Dräger 1	16,0	49,0	39,0
Dräger 2	10,5	45,5	41,2

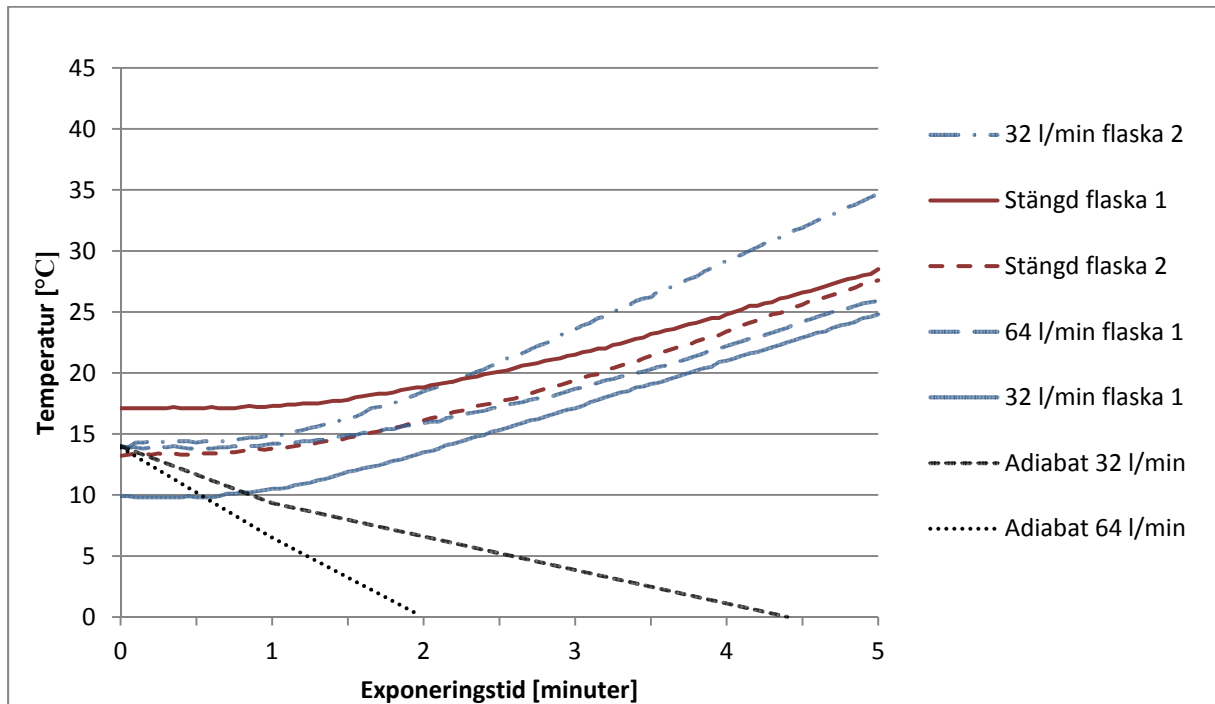
¹Tog extra tid innan mätning => egentligen lägre temp vid exponeringens slut

Vid försök med luftuttag kunde inte trycket mätas under exponeringen och inte heller direkt efter då den varma utrustningen tog för lång tid att montera isär. Som jämförelse mellan stängda flaskor, med ett luftuttag samt ett teoretiskt adiabatiskt luftuttag visas här diagram för varje märke enligt samma princip som i avsnitt 4.5. Den första minuten skedde i princip ingen uppvärmning vid den isolerade mätpunkten, därefter steg temperaturen i det närmaste linjärt under resten av exponeringen. Någon tendens till att uppvärmningen skulle avta, som i bastuförsöken, syns inte då differensen mellan flaskan och den omgivande temperaturen var stor under hela exponeringen. Skillnaden mellan den uppmätta temperaturen och den adiabatiska är större än vid försök i bastun. Då termoelementen inte var i direkt kontakt med gasen registrerade dessa den initiala temperatursänkningen med en fördröjning och påverkades samtidigt av uppvärmning utifrån.

Den adiabatiska temperaturkurvan har beräknats utifrån ett momentant lufttag på 29 gram då systemet trycksattes och vilken räknats in i den första minutens flöde. Då starttemperaturerna varierade har den adiabatiska temperaturen beräknats med utgångspunkt i en av mätningarna och slutar då temperaturen går under noll. Luftflödet har antagits vara 37,8 g/min under hela exponeringen vilket motsvarar en respiration på cirka 32 liter/min. Dessutom genomfördes ett försök per märke med det dubbla flödet. Resultat från försöken redovisas nedan i avsnitt 6.3.1-3 samt i bilagorna G (stängda flaskor), H (luftflöde 32 l/min) och I (luftflöde 64 l/min).

6.3.1 Resultat för tester med flaskor från MSA

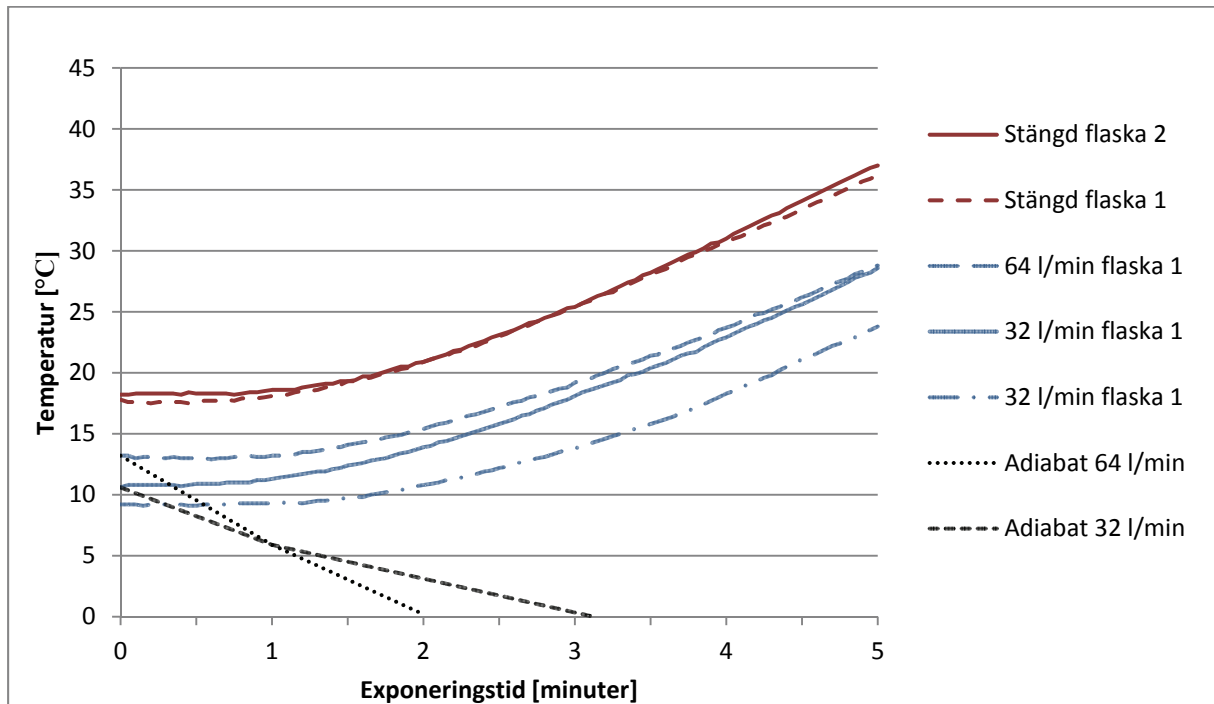
Spridningen mellan resultaten från försök i containern blir mycket tydlig i figur 20 där temperaturerna hos de isolerade termoelementen visas. Vid luftuttaget 32 l/min ur flaska två blir temperaturen högre än då flaska ett är stängd, trots att starttemperaturen var lägre. Med luftuttaget 64 l/min syns att temperaturstegringen inte är lika stor om en jämförelse görs med linjen 32 l/min flaska 1. Sluttemperaturen blir i samtliga fall under 35 °C.



Figur 20. Diagrammet visar fem olika försök på MSA flaskor med olika luftuttag samt två framtagna adiabatiska temperaturer som enbart bygger på teoretiska beräkningar vid olika luftuttag.

6.3.2 Resultat för tester med flaskor från Interspiro

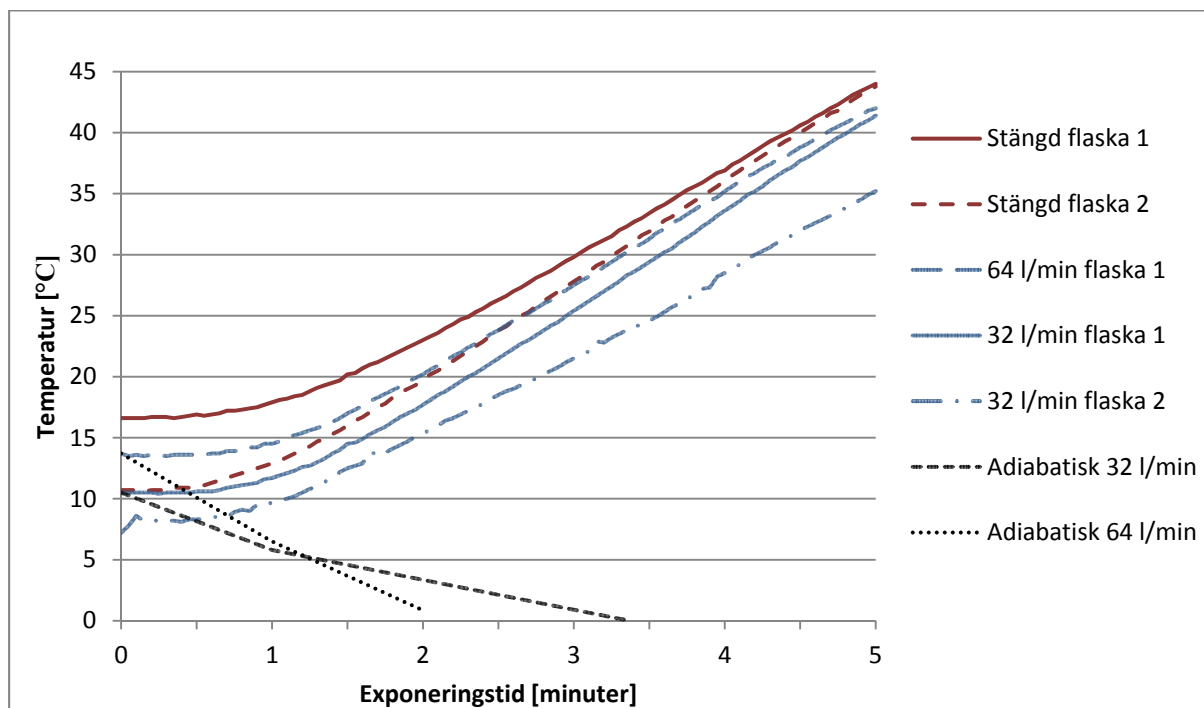
Starttemperaturerna var även vid dessa försök ojämna vilket syns i figur 21. Dock syns tendenser till att temperaturen inte ökar i samma omfattning vid försök med luftuttag som vid försök med stängda flaskor. Detta trots att starttemperaturerna vid luftuttag var lägre och därmed differensen till omgivande temperatur högre, vilket borde ha främjat värmeöverföringen. Sluttemperaturerna är i samtliga fall under 40 °C, oavsett starttemperatur och eventuellt luftuttag.



Figur 21. Diagrammet visar fem olika försök på Interspiro flaskor med olika luftuttag samt två framtagna adiabatiska temperaturer som enbart bygger på teoretiska beräkningar vid olika luftuttag.

6.3.3 Resultat för tester med flaskor från Dräger

Trots en spridning mellan starttemperaturerna kan lufttuttgets avkylande effekt antydast i figur 22. Vid flödet 64 l/min blev sluttemperaturen lägre än vid försöket där flaskan två var stängd. Detta trots att starttemperaturen var cirka fem grader högre vid försöket med lufttutttag. I det fall där starttemperaturen var någorlunda lika mellan *stängd flaskan 2* och *32 l/min flaskan 1* blev skillnaden i sluttemperatur cirka fem grader lägre vid lufttutttag.



Figur 22. Diagrammet visar fem olika försök på Dräger flaskor med olika lufttutttag samt två framtagna adiabatiska temperaturer som enbart bygger på teoretiska beräkningar vid olika lufttutttag.

7 Diskussion

7.1 Övergripande

Till viss del har diskussion förts löpande i texten och då främst i resultatdelen för att besvara frågor som kan uppstå vid läsningen. I detta kapitel diskuteras inledningsvis de övergripande val som anses kunna påverka resultatet, därefter mer specifika frågor för de genomförda försöken.

Författarna har valt att i denna rapport titta på tre olika kompositflaskor Interspiro, Dräger och MSA då dessa är de mest använda inom räddningstjänsten i Sverige och då dessa fanns tillgängliga hos MSB i Revinge. Av denna anledning är rapporten oberoende av tillverkarna och den använda utrustningens slitage anses representativ. De testade flaskorna skiljer sig även åt i konstruktionssätt och representerar på så sätt en stor del av marknaden.

Testerna har utförts på två flaskor av respektive märke, förutom vid testerna med ett luftuttag på 64 l/minut. Detta ger ett begränsat statistiskt urval men då resultaten, främst från försöken i bastun, är jämna anses dessa tillförlitliga.

Tester med ett luftuttag på 64 l/min kan anses vara mer representativ till verkliga förhållanden under en insats med invändig brandsläckning men författarna har valt att inrikta sig på mätningar med ett luftuttag på 32 l/min för att vara konservativa i sina beräkningar då detta ger en lägre avkylande effekt.

Inledningsvis genomfördes ett antal försök med olika sorters isolering kring termoelementen, olika luftuttag och reglerutrustning samt olika placering av termoelementen. Försöken, som redovisas i avsnitt 6.1 visade att flaskorna blir relativt jämnvarma. Därmed spelar placeringen av de isolerade termoelementen inte någon större roll och det är dessa mätvärden som använts i rapporten. För de oisolerade gör det skillnad om de placeras exempelvis under skyddshättor eller i kontakt med bärstället. Även placeringen i höjddled kan göra skillnad, främst i containerförsöken. Detta då försökspersonernas längd och agerande i testrummet påverkar ytemperaturen. Då termoelementen inte var limmade mot flaskans utsida syns i vissa fall även då tejen släppt något och mätpunkten inte är i direktkontakt med ytan. Temperaturen blev i dessa fall avsevärt högre, även om avståndet mellan flaska och mätpunkt endast var någon enstaka millimeter. För de isolerade termoelementen finns inte denna variation i mätresultaten. Då rapporten inriktar sig på gastemperaturen i flaskan har resultaten från de oisolerade mätpunkterna inte åtnjutits någon större vikt. Eftersom flaskorna även testas enligt de europeiska normerna där de utsätts för direkt flampåverkan av flaskornas utsida, anses inte ytemperaturen vara direkt begränsande.

De teoretiska beräkningarna innehåller vissa förenklingar och antagande, exempelvis i form av medelvärden på termodynamiska storheter och ansättande av systemgränser. Då noggrannheten i beräkningarna ändå är högre än precisionen i mätinstrument och övriga förhållanden vid de empiriska försöken anses inte detta påverka resultaten signifikant.

7.2 Försök i bastu

Bastun i brandtekniks laboratorium visade sig utgöra en mycket bra testmiljö. Den stabila temperaturen och begränsade luftströmningarna i kombination med att flaskorna testades stillaliggande gav mycket jämna resultat. Möjligheten att mäta trycket under exponeringen gjorde att gastemperaturen kunde uppskattas med bättre precision än vid försök i varmare miljö.

Vissa problem fanns med mätutrustningen för temperatur och luftflöde. De termoelement som registrerade omgivningstemperaturen vid försök med luftuttag visade i vissa fall orimligt låga värden. Temperaturen upplevdes subjektivt av författarna som liknande mellan försöken och den analoga termometern visade en stabil temperatur. Det är inte heller rimligt att temperaturen skulle kunna variera så mycket och så oregelbundet. Detta då försöken utfördes i en följd och bastun hade varit uppvärmd i cirka sex timmar för att skapa en stabil miljö. Några variationer av dessa slag har inte heller observerats vid tidigare försök trots att försökupställningen varit densamma.

Luftflödet styrdes med reglerventil och flödesmätare. För att fastställa luftflödet och det initiala luftuttaget då systemet trycksattes vägdes flaskorna innan och efter exponeringen. Vågen visade sig dock ge något olika utslag beroende på placering. En bättre kalibrerad våg hade varit att föredra, men detta antas inte ha påverkat resultaten i någon större omfattning.

7.3 Försök i container

Försöksanläggningen i Karlstad har under många år inte använts till standardiserade tester. Då det finns brister i underhållet och vissa kunskaper om anläggningens handhavande har gått förlorade så uppfyller i dagsläget inte anläggningen de krav som ställs i Nordtest NT Fire 052. Det främsta problemet var att reglera gastillförseln och få en jämn temperatur samt att strålningsintensiteten inte kunde mätas. Vidare var den dator som var avsedd för temperaturmätning inte helt tillförlitlig. Istället för de befintliga instrumenten installerades nya termoelement och temperaturen loggades med samma typ av utrustning som använt till övriga mätningar. Dock fanns det problem även med denna utrustning, exempelvis i form av glappkontakt i termoelementen. Anläggningens stora fördel var möjligheten till att skapa en mycket varm miljö med höga temperaturer och med en relativt bra regleringsmöjlighet.

Avsaknaden av klimatrum medförde att flaskornas starttemperaturer varierade och inte heller kan antas ha varit helt homogena. Utrymmet där flaskorna förvarades kylades av under de kalla nätterna och värmdes upp under dagarna då värme från testrummet spred sig i anläggningen. Skillnaderna var i vissa fall över 10 °C vilket gör det svårt att analysera varför energiupptaget varierar mellan olika försök och flasktyper.

Den mycket varma temperaturen begränsade valet av mätutrustning till enbart temperaturloggar i själva testrummet. Den korta exponeringstiden i kombination med de höga temperaturerna gjorde det svårt att analysera om värmen till de isolerade termoelementen kommit via flaskan eller genom isoleringen. För en noggrannare mätning av den faktiska temperaturen i flaskorna borde trycket ha mätts. Vid försök med luftflöde kunde inte trycket mätas snabbt nog efter exponeringen då den varma utrustningen tog för lång tid att montera isär. Det bästa hade varit att logga trycket kontinuerligt, både vid försök med luftuttag och stängda flaskor. En mer kostsam manometer hade kunnat erbjuda denna möjlighet.

Förutom problem med den tekniska utrustningen fanns även vissa praktiska svårigheter som kan ha påverkat resultatet och som har försvårat analysen. Missförstånd mellan försökspersonerna och testledaren medförde ibland att fel position intogs och att tiden för växling mellan positionerna varierade. Skillnaderna i längd mellan försökspersonerna gjorde att flaskornas position i höjddled varierade och därmed den omgivande temperaturen. Storleken på den lucka som leder in till testrummet medförde att större testpersoner behövde längre tid för att komma in till startpositionen.

7.4 Försöksmiljöernas giltighet

De miljöer som använts vid försöken i denna rapport är tänkta att representera de förhållanden som personal i räddningstjänst normalt kan komma att utsättas för. Då räddningstjänst, i synnerhet vid arbete med invändig släckning, erbjuder svårkontrollerade förhållanden är det problematiskt att hitta representativa miljöer. Målet har varit att skapa marginaler i resultaten genom att använda miljöer som är ofördelaktiga för flaskorna och där den fysiska belastningen på brukaren närmar sig vad som är rimligt ur ett arbetsmiljöperspektiv.

Standarden Nordtest NT Fire 052 är framtagen för testa en komplett skyddsutrustning som ett helt system. Vid försöken i containern deltog, förutom författarna själva, brandmän från Räddningstjänsten i Karlstadregionen. Dessa var av åsikten att exponeringen var minst lika, om inte mer, krävande än vad som kan förväntas vid invändig brandsläckning.

Försöken i bastun var tänkta att representera en situation med längre arbete i hög temperatur men utan direkt närhet till en brandhård. Som exempel kan nämnas rökdykledare vid framskjuten baspunkt i en större byggnad och där det brinner i angränsande lokaler. Som subjektiv jämförelse testade författarna att sitta i bastun iklädda fullt RB90 med gummistövlar och andningsapparat. Trots att försöket genomfördes stillasittandes och på en något svalare position än där flaskorna testades var försökspersonerna mycket varma efter 20 minuter och kraftigt värmepåverkade efter en halvtimme. En exponering på 20 minuter i en något varmare miljö ansågs därför vara vad som maximalt ska förekomma om arbetet ska kunna utföras säkert. Respirationen var 15-25 liter/minut vilket är normalt för helt stillasittande. Om någon form av arbete hade utförts skulle andningsfrekvensen ökat samt den tolerabla exponeringstiden ha förkortats avsevärt. Under försöken valdes ett luftuttag motsvarande en respiration på cirka 30 liter/minut. Detta anses vara lågt i sammanhanget och ger därför en mindre avkylande effekt än vad som kan väntas vid en verklig insats. Resultat från försöken anses därför vara konservativa.

8 Förslag till fortsatt forskning

I denna rapport har endast utrustning från tre leverantörer testats, men fler finns att tillgå. Vissa leverantörer har dock ingen egen produktion av flaskor utan köper från andra. Om liknande försök ska genomföras bör man först kontrollera så att flaskorna inte är av samma sort. Detta gäller även för andra typer av gasflaskor där vissa tillverkare står för stora delar av världsproduktionen.

Rapporten kan förhoppningsvis användas som inspiration till nya undersökningar, exempelvis om hur snabbt gasflaskor i brandutsatta miljöer värms upp och vad detta medför för risker. Vid en sådan undersökning kan man däremot inte använda endast en mätpunkt per flaska. Uppvärmningen och temperaturfördelningen kan inte, utan vidare undersökning, antas vara homogen hos en större flaska som står på golvet. Temperaturen i den omgivande luften kommer troligen att variera med höjden och direktkontakt med golvet kan ge en avkylande effekt.

I dag används nästan uteslutande flaskor av kompositmaterial till andningsapparater. Tidigare användes flaskor av stål eller aluminium men dessa har inte undersökts i denna rapport. Det hade varit intressant att utföra liknade tester för att undersöka hur material och konstruktioner påverkar uppvärmningen.

Författarna anser att det bästa sättet att mäta gastemperaturen vore att placera ett termoelement fritt hängande i flaskan. Som alternativ kan en manometer med loggfunktion användas i kombination med en våg med bra precision. Vid de försök som genomförts har det inte funnits tillgång till denna typ av utrustning men det rekommenderas starkt vid eventuella framtida undersökningar då det skulle underlätta beräkningar och öka säkerheten i resultaten.

Försök med Nordtest NT Fire 052 är en bra metod för att testa utrustning och olika typer av system. Även om containern i Karstad inte till fullo uppfyller standarden så erbjuder den utmärkta möjligheter att jämföra utrustning vid exempelvis nyanskaffning. Testmetoden och den nuvarande containern är dock begränsad vid försök som kräver hög noggrannhet och repeterbarhet. Innan sådana försök genomförs bör temperaturregleringen justeras och någon form av klimatrum byggas.

Rapporten visar att luftflaskorna inte är en begränsande faktor vid normal användning. Vid försöken i containern kunde dock observeras kraftig värmepåverkan på andra delar av utrustningen. Andningsmasken som försökspersonen använde började vid ett tillfälle att smälta och vissa metalldetaljer på bärselarna blev varma nog att skapa brännskador. Vid två tillfällen smälte nackbandet på hjälmen då inte hela den del som stack ut under kanten var skyddad mot värmepåverkan, se figur 23. Det finns alltså alla anledningar att testa mer utrustning under de förhållanden som råder i standarden Nordtest NT Fire 052. Standarden anses representera en extrem, men inte orealistisk, miljö för personal i räddningstjänst och då måste utrustningen fungera.



Figur 23 Hjälmens nackband har smält på den oskyddade delen och nästan gått av.

9 Slutsatser

Försöken i Karlstad visar att gastemperaturen i de stängda flaskorna ligger klart under den maximala användningstemperaturen. Då dessa försök genomfördes utan luftuttag så fanns inte heller någon avkylande effekt och resultaten kan därmed anses som konservativa även om försöken inte helt följde Nordtest NT Fire 052. Vid försök med luftuttag gjorde svårigheterna att mäta gastemperaturen och de varierande försöksförhållandena i övrigt att författarna inte vill dra några specifika slutsatser.

Vid försöken i Brandtekniks bastu blev gastemperaturen i de stängda flaskorna i närheten av den maximala användningstemperaturen. Ingen av flaskorna blev varmare än föreskrivet och då ett luftuttag om cirka 30 l/min användes syntes en klart avkylande effekt.

Både beräkningarna och de empiriska försöken visar att det blir en kraftig temperatursänkning då det tas ut luft från systemen. I vissa fall motverkar luftuttaget helt den uppvärmning som sker och i vissa fall så sker endast en fördröjning. Fördröjningen är dock tillräcklig för att skapa en tidsmarginal som anses längre än vad brukaren av utrustningen klarar av vid de aktuella temperaturerna. Slutsatsen blir att personen som använder andningsapparaten kommer att behöva avbryta insatsen innan gastemperaturen överstiger den maximala användningstemperaturen.

Till följd av luftuttag sker även en trycksänkning vilket minskar belastningen på flaskorna och skapar en marginal till den maximala hållfastheten.

Resultaten av mätningarna visar på en viss skillnad mellan de olika märkena och konstruktionstyperna. Författarna vill dock inte påstå att det föreligger någon relevant skillnad utan istället påtala att samtliga system ligger under de maximala användningstemperaturerna. Uppvärmningen av flaskorna utgör inte ett avgörande kriterie vid val av system. Istället bör kriterier som exempelvis passform och användarvänlighet väga tyngre.

Avslutningsvis görs bedömningen att uppvärmningen av luftflaskorna vid normal användning inte utgör någon fara för användaren.

10 Ordlista

Ordlistan är anpassad till denna rapport och målgruppen. För en mer utförlig och korrekt förklaring av förekommande begrepp hänvisas läsaren till litteraturen i kapitel 11.

AFS	Arbetsmiljöverkets författningssamling (föreskrifter)
Bristningstrycket	Det maximala trycket som ett tryckkärl klarar innan det brister
Bruttöjning	Materialegenskap, ett mått på sprödhet
CEN	European Committee for Standardization
Certifiering	Bevis på uppnådda mål och krav
Datalogg	Elektroniskt mätinstrument med mätvärdesminne
Doseringsventil	Reglage för att kontrollera flöde till andningsmask
Draghållfasthet	Materialegenskap, mått på dragstyrka
Empiriska försök	Experiment med verkliga mätningar och iakttagelser
EN	Europeisk standard
Entalpi, h	Mått på den inre energin och energi från tryck/volym
Fluid	Rörligt medium såsom gaser och vätskor
Flödesmätare	Mätinstrument för att mäta flöde, här av luft
Hazardous conditions	Innebär fara, men inte akut risk för liv och hälsa
Hållfasthet	Materialegenskaper, förhållande mellan belastning och materialets deformation
Inre energi, u	Den energi som varje atom har, utom kärnenergi
Kemisk beständighet	Materialegenskap, förmåga att motstå kemisk reaktion
Klimatrum	Rum med kontrollerad temperatur och luftfuktighet
Konduktion	Se Ledning
Konvektion	Värmetransport via en fluid till ett fast material
Ledning	Värmetransport genom direktkontakt mellan atomer
Linjärt samband	När parametrar är direkt beroende av varandra
Livslängd	Den tid som produkten förväntas vara i bruk
Lågtrycksslang	Slang mellan regulator och doseringsventil
Manometer	Tryckmätare
Membran	Envägsventil för luft på väg ut från doseringsventilen
RB 90	Skyddskläder för brandmän
Reglerventil	Reglage för att kontrollera flöde
Regulator	Sänker flasktrycket till ett förinställt lägre tryck
SCBA (Self Contained Breathing Apparatus)	Bärbar tryckluftsapparat av typen öppet system
Sprängtryck	Se bristningstryck
SS-EN	Anpassad svensk standard från en EU-norm
Strålningsskärm	Material som förhindrar genomgående strålning
Termoelement	Mätsond för att mäta temperatur
Viskositet	Fluids rörelseegenskaper (trög/lättflytande)

11 Källor

- AFS1999:4 *Tryckbärande anordningar*. Stockholm: Arbetsmiljöverkets Författningssamling 1999.
- AFS2001:3 *Användning av personlig skyddsutrustning*. Stockholm: Arbetsmiljöverkets Författningssamling 2001
- AFS 2007:7 *Rök- och kemdykning*. Stockholm: Arbetsmiljöverkets Författningssamling 2007
- Arbetsmiljöverket. *Om oss – Arbetsmiljöverket*. (Elektronisk). Tillgänglig <<http://www.av.se/omoss/>> (2011-02-14).
- Borgström, F. (2009). *Strålningsrespons hos brandhjälmar*. Examensarbete Lunds Tekniska Högskola, Brand och riskhantering Rapport 5316. Lund: Lunds universitet
- Brandsjö, K. (1986). *Brandförsvarets historia*. Streiffert & Co Bokförlag HB: Stockholm
- Brandsjö, K. (2004). Användes skägget som andningsfilter? *Populär Historia* nr 11:2004
- Çengel, Y. Turner, R. Cimbala, J. (2008). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. New York. Mc-Graw-Hill
- Çengel, Y.(1997). *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. New York. Mc-Graw-Hill
- CEN European Committee for Standardization. *About us*. (Elektronisk). Tillgänglig <<http://www.cen.eu/cen/AboutUs/Pages/default.aspx>> (2011-02-14)
- Dräger Safety AG& Co. (2009). *Dräger compressed air cylinders product information 90 46 796 en*. Dräger Marketing Communications
- SS-EN 659 :2004 *Skyddshandskar för brandmän*. Stockholm: SIS Förlag AB
- SS-EN 137:2006 *Andningsskydd – Bärbar tryckluftsapparat med öppet system med helmask*. Stockholm: SIS Förlag AB
- SS-EN 12245:2009 *Gasflaskor – Hellindade gasflaskor av kompositmaterial*. Stockholm: SIS Förlag AB
- Drysdale, D. (2000). *An introduction to fire dynamics*. Chichester: John Wiley & Sons
- Statoil. (2006). *Gasol Propan 95 Produktblad*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.statoil.se/file_archive/07produktdatablad/GasolPropan95.pdf> (2011-02-14).
- Hoschke, B. N. (1981). Standards and specifications for firefighters' clothing. *Fire Safety Journal* nr 4, ss 125-137.
- Interspiro. *A brief history of Interspiro*. (Elektronisk). Tillgänglig: <<http://www.interspiro.com/history.htm>> (2011-02-14)
- Jönsson, G. (2003). *Grundläggande fysik om gas och vätskor*. Lund: Studentlitteratur
- Nordtest Method. *NT Fire 052*. (Elektronisk). Tillgänglig: <<http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/fire052.pdf>> (2011-02-14)
- Räddningsverket. (1995). *Säkerhet för brandpersonal*. Karlstad: Statens Räddningsverk (Rapport räddningstjänst T81-337/95).
- Svensson, S. (2010). *Angående användning av luftflaskor till andningsapparater i varm miljö*. Revingeby: Myndigheten för samhällskydd och beredskap (PM, Diarienummer 2010-2079)
- Särdqvist, S. (2006). *Vatten och andra släckmedel*. Karlstad: Räddningsverket

Bilaga A, Använda flaskor och andningsskydd

Interspiro

Flaskmaterial: Liner av termoplast, kolfiberlindning och epoxy.

System: Dubbelflaskor

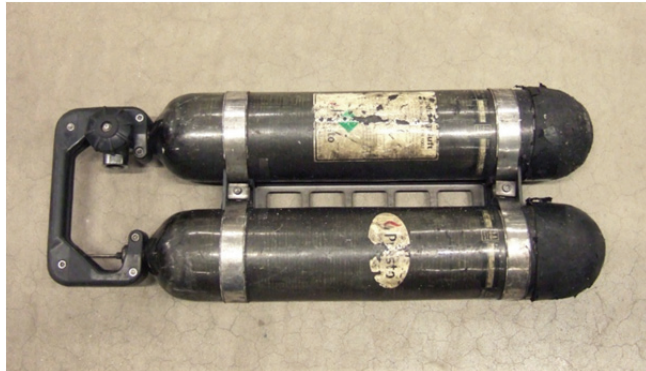
Volym: 2x3,4 l

Tomvikt: cirka 7 kg

Arbetstryck: 300 Bar

Provtryck: 450 Bar

Bärsele: Bärplatta



MSA

Flaskmaterial: Liner av termoplast, kolfiberlindning, tunn glasfiberlindning och ytterst epoxi

System: Enkelflaska

Flasktillverkare: Ullit

Volym: 6,8 l

Tomvikt: cirka 5 kg

Arbetstryck: 354 Bar

Provtryck: 506 Bar

Bärsele: eXXstreme



Dräger

Flaskmaterial: Liner av aluminium, kolfiberlindning, glasfiberlindning och ytterst epoxi

System: Enkelflaska

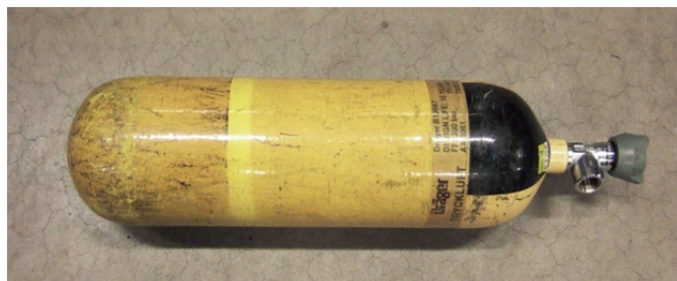
Volym 6,8 l

Vikt: cirka 5 kg

Arbetstryck: 300 Bar

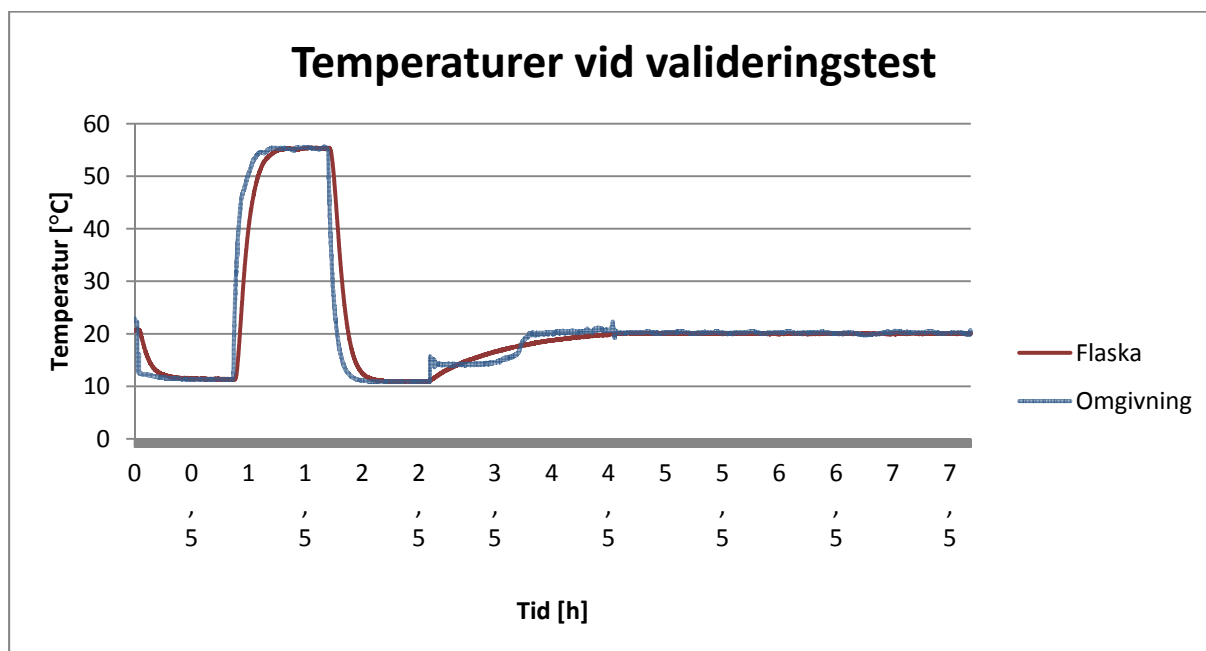
Provtryck: 450 Bar

Bärsele: Dräger PSS 7000



Bilaga B, Valideringstest av beräkningar med gaslagar

Till försöket användes flaskan Dräger 2 vilken acklimatiserades i ett dygn i klimatrums. Flaskan sköljdes i ett vattenbad för att få en effektiv värmetransport och stabil temperatur. Vattentemperaturen reglerades till kallt, varmt och tillbaka till kallt varefter flaskan återigen placerades i klimatrums, se figur B1.



Figur B1. Temperatur i flaska och omgivning vid valideringstest. Vid tre timmar finns ett kort avbrott i mätserien då flaskan flyttades från vattenbad till klimatrums.

Gasens starttryck var 209,9 bar och avlästes därefter när flaskan och omgivningens temperatur var lika. Starttrycket var något högre än vid övriga försök i rapporten vilket anses skapa en liten marginal. Detta då gaslagarnas precision minskar vid ökat tryck och avvikelsen från verkliga förhållanden ökar. Med utgångspunkt i starttryck och temperatur beräknades gasens teoretiska temperatur, resultaten redovisas i tabell B1.

Tabell B1. Temperaturer och tryck hos gasens i testflaskan.

Tryck [bar]	Temperaturer i Kelvin enligt:		
	Termoelement	Beattie-Bridgeman	Ideala gaslagen
209,9	293,9	-	-
200,4	284,5	284,7	280,6
245,6	328,5	328,4	343,8
200,0	284,1	284,3	280,0
209,6	293,2	293,6	293,4

Utifrån försöket drogs slutsatsen att Beattie-Bridgemans gaslag stämmer väl överrens med verkliga förhållanden i det aktuella tryck och temperaturområdet. Den ideala är något sämre vid rumstemperatur och kallt vatten, vid varmt vatten blir skillnaden större, som mest cirka 15 grader. Detta beror på att den ideala gaslagens inte beaktar molekylernas interaktion vid högre tryck och temperatur. Jämförelsen av temperaturerna är i Kelvin, som är en absolut temperaturskala, och visar på cirka fem procents avvikelse för den ideala gaslagen vid den högsta temperaturen.

Bilaga C, Temperatursänkning till följd av luftuttag

Exempel på hur temperaturen förändras hos en gasvolym i en flaska när luft tas ut momentant och utan att någon uppvärmning sker från omgivningen. Beräkningen följer resonemanget i kapitel 4.5 och värden har hämtats ut tabell A-21 (Çengel 2008). Start- och slutmassa hos gasen i flaskan har beräknats med Beattie-Bridgemans gaslag men även den ideala ger ett liknande resultat.

Ekvation 4 används för energibalansen.

$$(m_2 - m_1)c_{p\text{ avg}}\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) + m_1u_1 - m_2c_{v\text{ avg}}T_2 = 0$$

Flaskans volym: $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ 6,8 liter

Starttemperatur: 298,15 K 25 °C

Starttryck 20101,3 kPa 200 bar manometertryck

Mängd luft ut $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ 150 liter

$c_{p@250 \text{ K}}$ 1,003 kJ/kg K $c_{p@300 \text{ K}}$ 1,005 kJ/kg K

$\Rightarrow c_{p\text{ avg}}$ 1,004 kJ/kg K

$c_{v@250 \text{ K}}$ 0,716 kJ/kg K $c_{v@300 \text{ K}}$ 0,718 kJ/kg K

$\Rightarrow c_{v\text{ avg}}$ 0,717 kJ/kg K

$u_{@298 \text{ K}}$ 212,64 kJ/kg

m_1 1,605 kg

m_2 1,427 kg

Ekvation 4 får nu följande utseende:

$$(1,427 - 1,605) \cdot 1,004 \cdot \left(\frac{298,15 + T_2}{2}\right) + 1,605 \cdot 212,64 - 1,427 \cdot 0,717 \cdot T_2 = 0$$

Den enda okända i ekvationen är nu T_2 som beräknas till 282,8 K eller 9,7 °C.

Momentant uttag av cirka 150 liter luft från flaskan resulterar i en temperatursänkning med cirka 15 grader.

Bilaga D, Försök med temperatursänkning till följd av luftuttag

Till försöket användes en aluminiumflaska på cirka 1,6 liter som acklimatiserats ett dygn i klimatrum. På flaskkranen kopplades manometer och en ventil som användes för att snabbt tömma ut cirka 2/3 delar av innehållet. Då ventilen stängdes steg trycket inom loppet av några sekunder från cirka 60 till över 80 bar i och med att den avkylda gasen tog energi från den varmare flaskan. Det faktiska sluttrycket var okänt men antas ha varit 60 bar med utgångspunkt i vad som avlästes på manometern under luftuttaget. Beräkningen följer resonemanget i avsnitt 4.5 och bilaga C. Startmassa hos gasen i flaskan har beräknats med Beattie-Bridgemans gaslag och egenskaper för luft har hämtats ut tabell A-21 (Çengel, 2008). Slutmassa har bestämts genom vägning av flaskan på en våg med 0,1 grams noggrannhet.

Ekvation 4 används för energibalansen.

$$(m_2 - m_1)c_{p\text{ avg}} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) + m_1 T_1 c_{v\text{ avg}} - m_2 c_{v\text{ avg}} T_2 = 0$$

Flaskans volym: $1,5575 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ 6,8 liter

Starttemperatur: 293,05 K 19,9 °C

Starttryck 20801,3 kPa 207 bar manometertryck

Massa luft ut 0,218 g

$c_{p@250 \text{ K}}$ 1,003 kJ/kg K $c_{p@300 \text{ K}}$ 1,005 kJ/kg K

$$\Rightarrow c_{p\text{ avg}} \quad 1,004 \text{ kJ/kg K}$$

$c_{v@250 \text{ K}}$ 0,716 kJ/kg K $c_{v@300 \text{ K}}$ 0,718 kJ/kg K

$$\Rightarrow c_{v\text{ avg}} \quad 0,717 \text{ kJ/kg K}$$

m_1 0,3930 kg

m_2 0,1750 kg

Ekvation 4 får nu följande utseende:

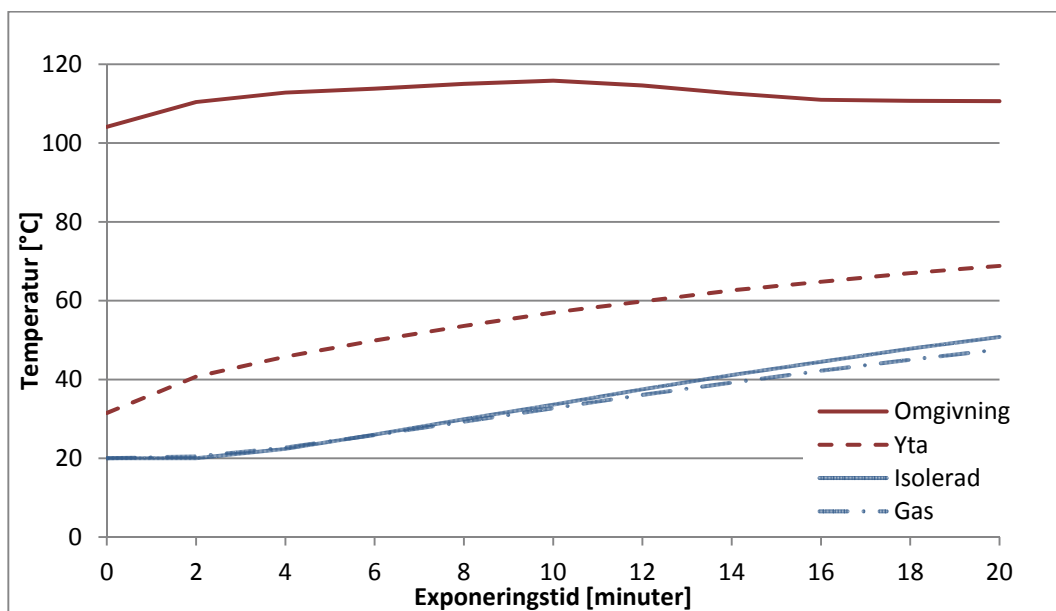
$$(0,175 - 0,393) \cdot 1,004 \cdot \left(\frac{293,05 + T_2}{2} \right) + 0,393 \cdot 293,05 \cdot 0,717 - 0,175 \cdot 0,717 \cdot T_2 = 0$$

Den enda okända i ekvationen är nu T_2 som beräknas till 215,0 K eller -58,15 °C.

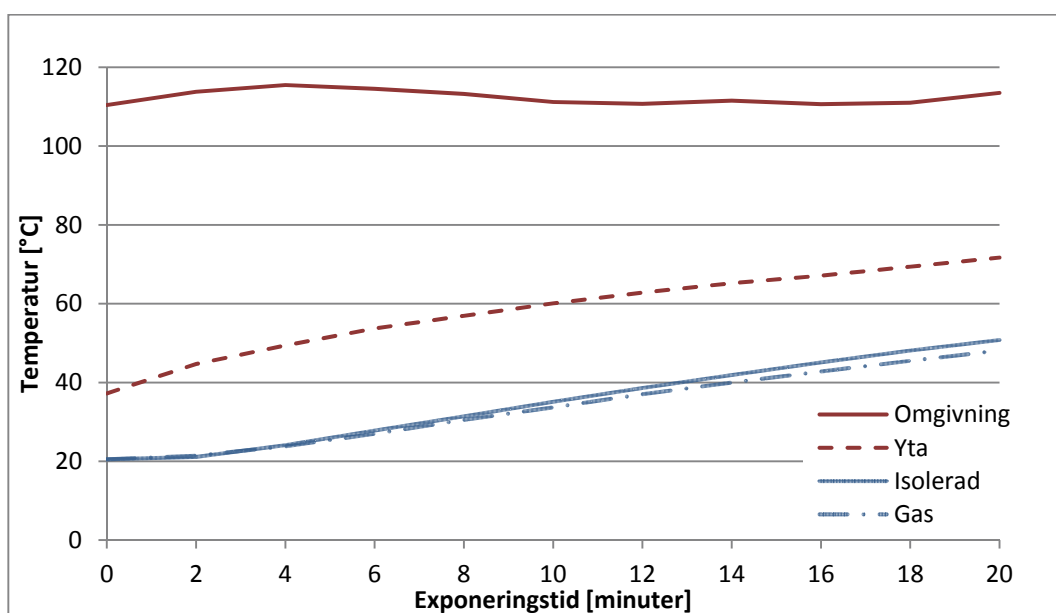
Med Beattie-Bridgemans gaslag beräknades att temperaturen i flaskan är -59,2 °C om gasmängden är 0,1750 kg och trycket 60 bar. Detta är endast en grads skillnad mot den teoretiskt beräknade sluttemperatur och modellen ansågs därför användbar i övriga delar av arbetet.

Bilaga E, Försök i bastu, diagram över försök med stängda flaskor

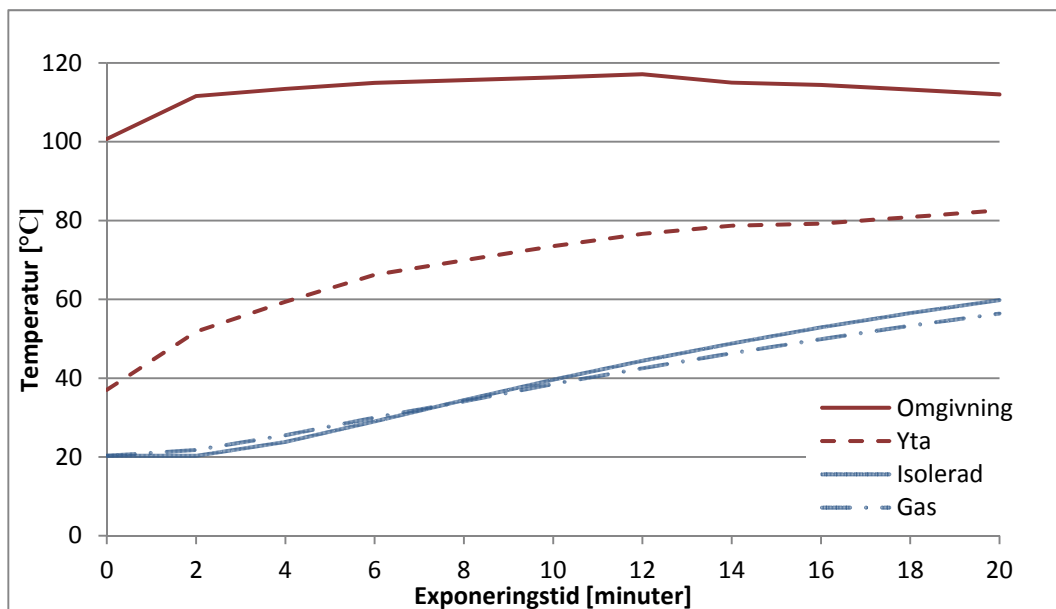
I denna bilaga presenteras diagram för varje enskilt försök med stängda flaskor i bastumiljö. Gastemperaturen har beräknats utifrån trycket som avlästes varannan minut. Övriga temperaturer loggades var tredje sekund men i figurerna redovisas endast den temperatur som rädde vid tid för tryckavläsningen.



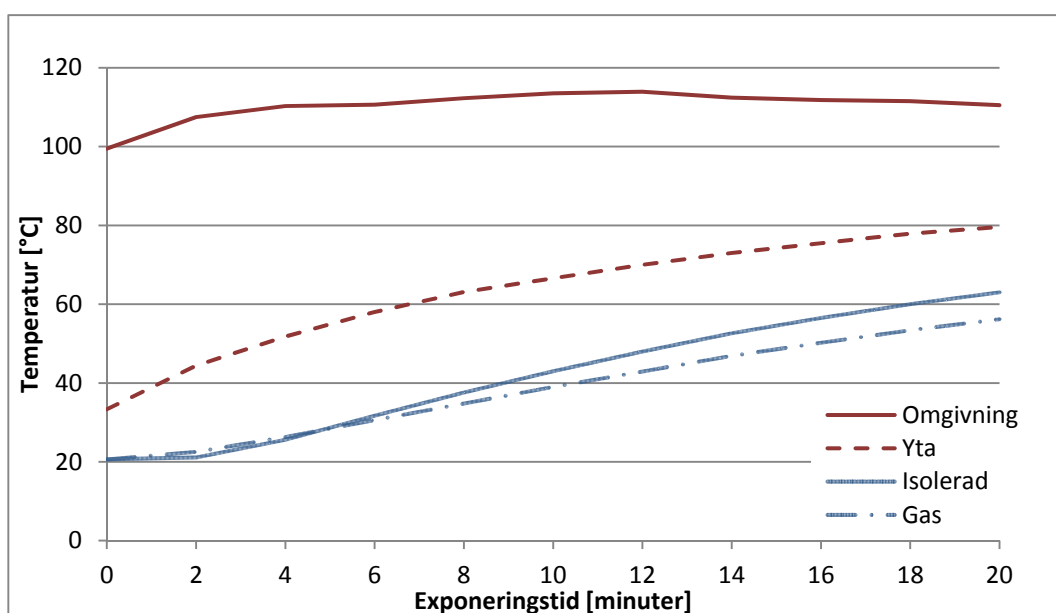
Figur E1. Flaska MSA 1 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 112 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 47,0 °C.



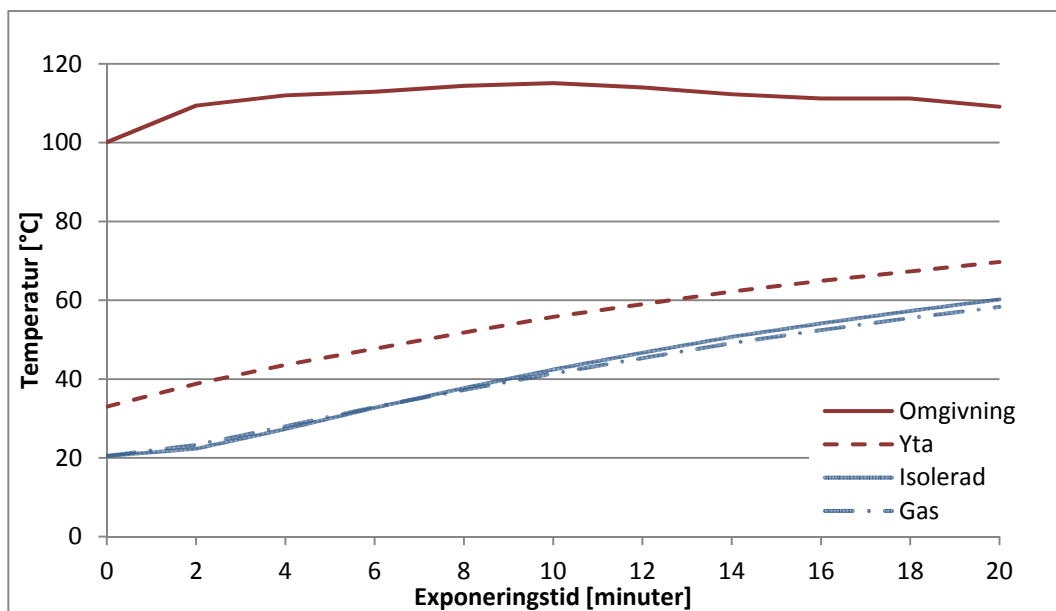
Figur E2. Flaska MSA 2 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 112 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 48,1 °C.



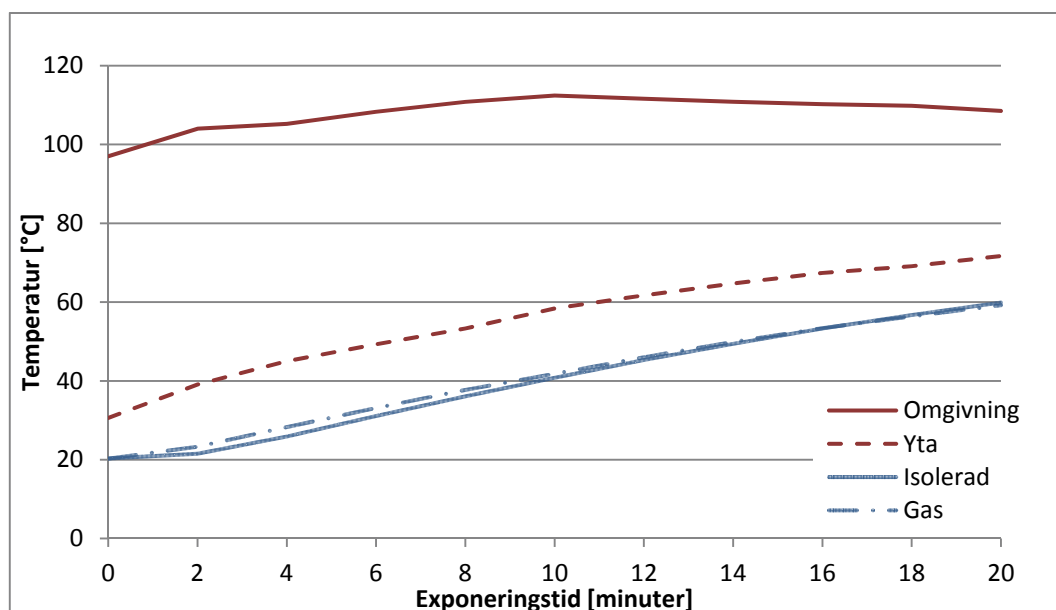
Figur E3. Flaska *Interspiro 1* vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 114 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 56,4 °C.



Figur E4. Flaska *Interspiro 2* vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 111 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 56,2 °C.



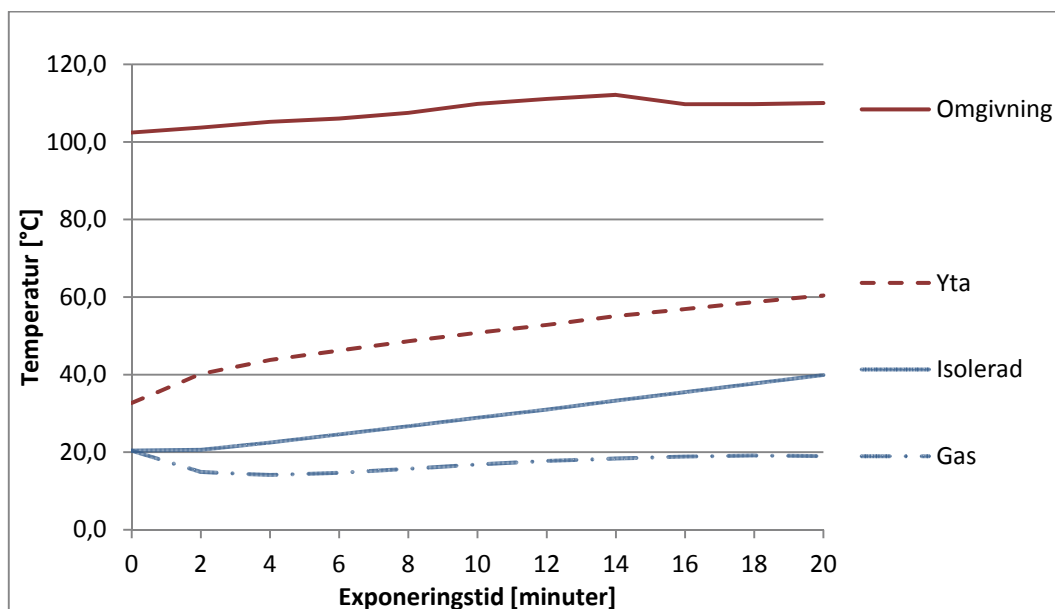
Figur E5. Flaska Dräger 1 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 112 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 58,3 °C.



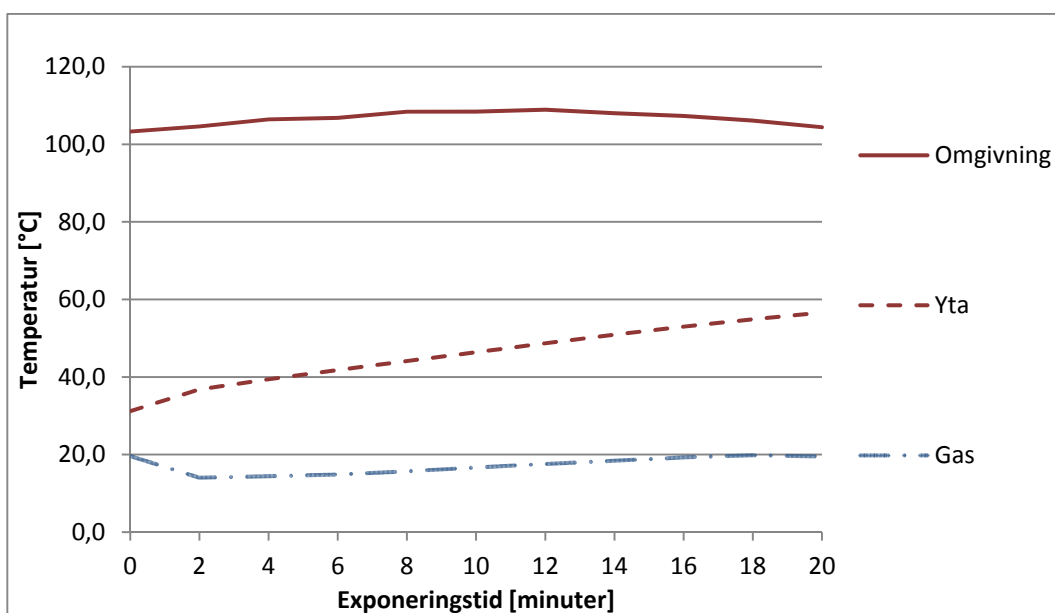
Figur E6. Flaska Dräger 2 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 109 °C. Flaskan var stängd och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 59,2 °C.

Bilaga F, Försök i bastu, diagram över försök med luftuttag

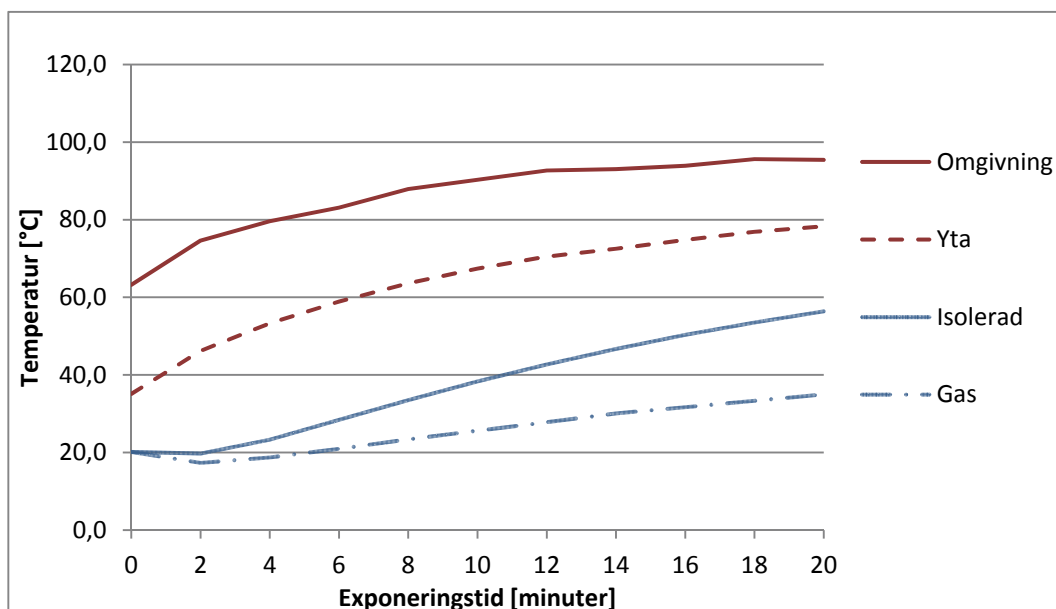
I denna bilaga presenteras diagram för varje enskilt försök med luftuttag om cirka 30 l/min i bastumiljö. Gastemperaturen har beräknats utifrån trycket som avlästes varannan minut. Övriga temperaturer loggades var tredje sekund men i figurerna redovisas endast den temperatur som rädde vid tid för tryckavläsningen. Mätutrustningen för omgivningstemperatur har troligen varit behäftad med fel varför dessa temperaturer ibland är orimligt låga.



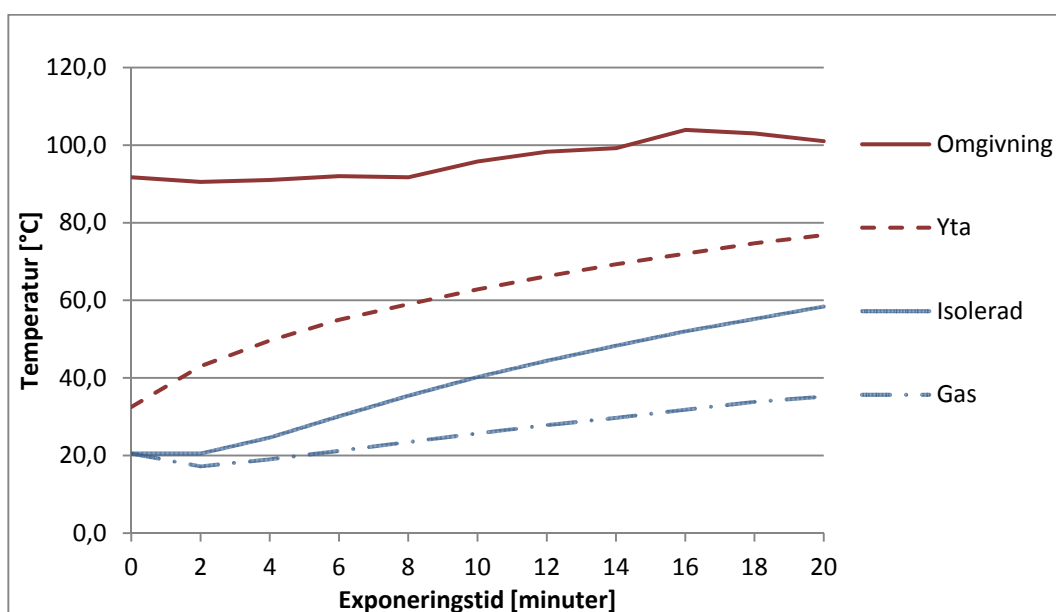
Figur F1. Flaska MSA 1 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 109 °C. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 19,0 °C.



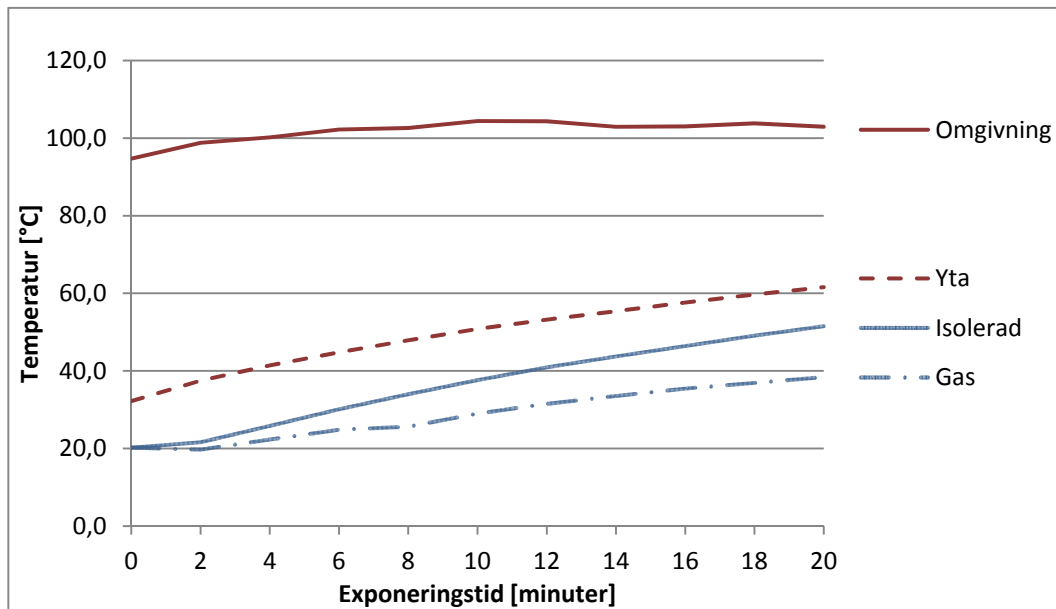
Figur F2. Flaska MSA 2 vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 107 °C. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 19,5 °C.



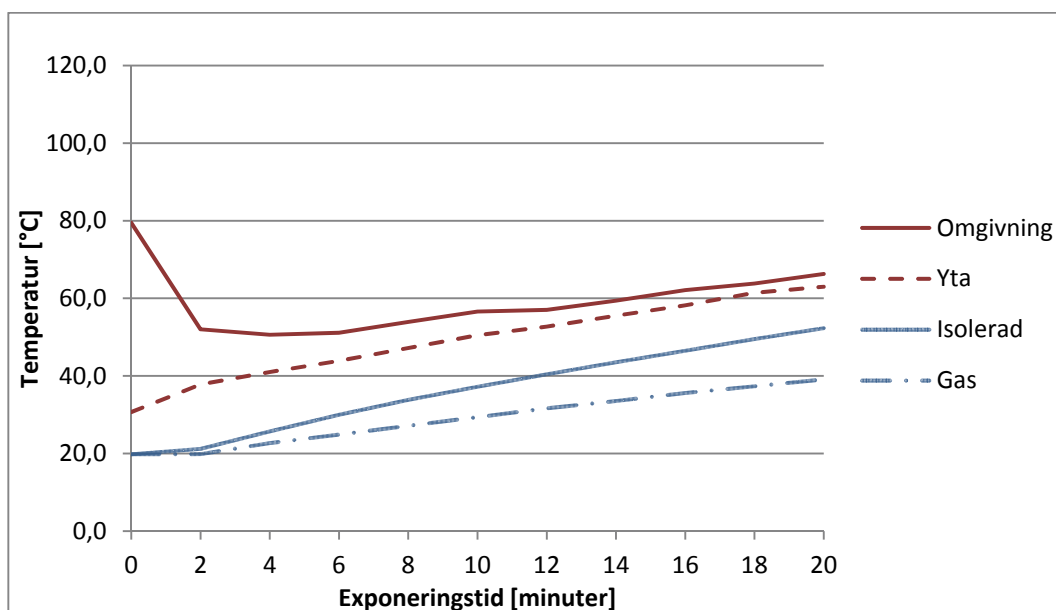
Figur F3. Flaska *Interspiro 1* vid 20 minuters exponering i bastun med den låga medeltemperaturen 87 °C, vilket troligen beror på fel i mätutrustningen. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 35,0 °C.



Figur F4. Flaska *Interspiro 2* vid 20 minuters exponering i bastun med den låga medeltemperaturen 96 °C, vilken troligen beror på fel i mätutrustningen. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 35,2 °C.



Figur F5. Flaska *Dräger 1* vid 20 minuters exponering i bastun med medeltemperaturen 102 °C, vilken troligen var högre. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 38,4 °C.

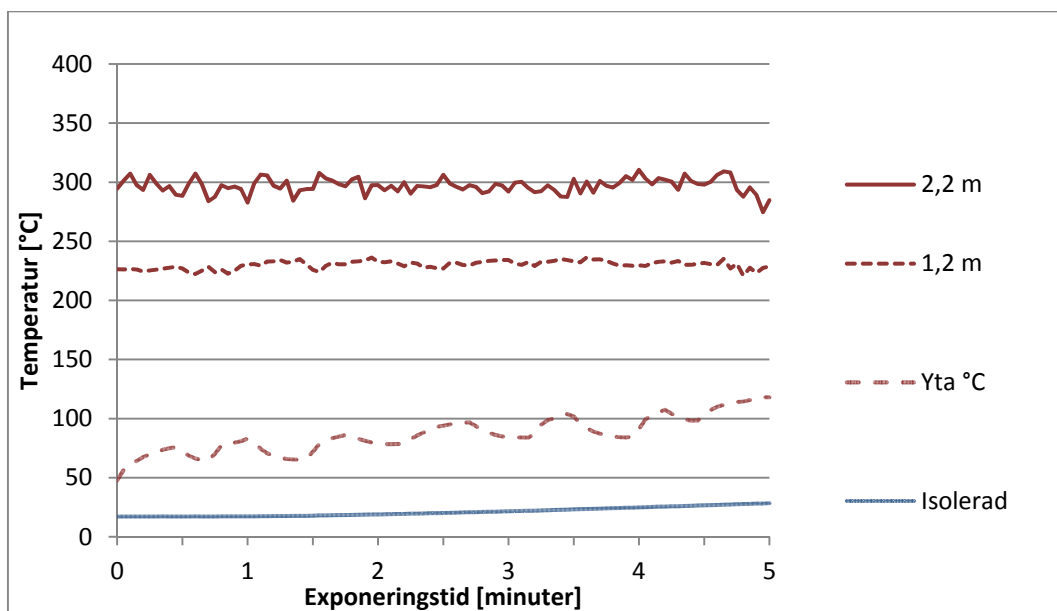


Figur F6. Flaska *Dräger 2* vid 20 minuters exponering i bastun med den låga medeltemperaturen 57 °C, vilken troligen beror på fel i mätutrustningen. Luftuttaget var cirka 30 l/min och sluttemperaturen på luften i flaskan blev 39,1 °C.

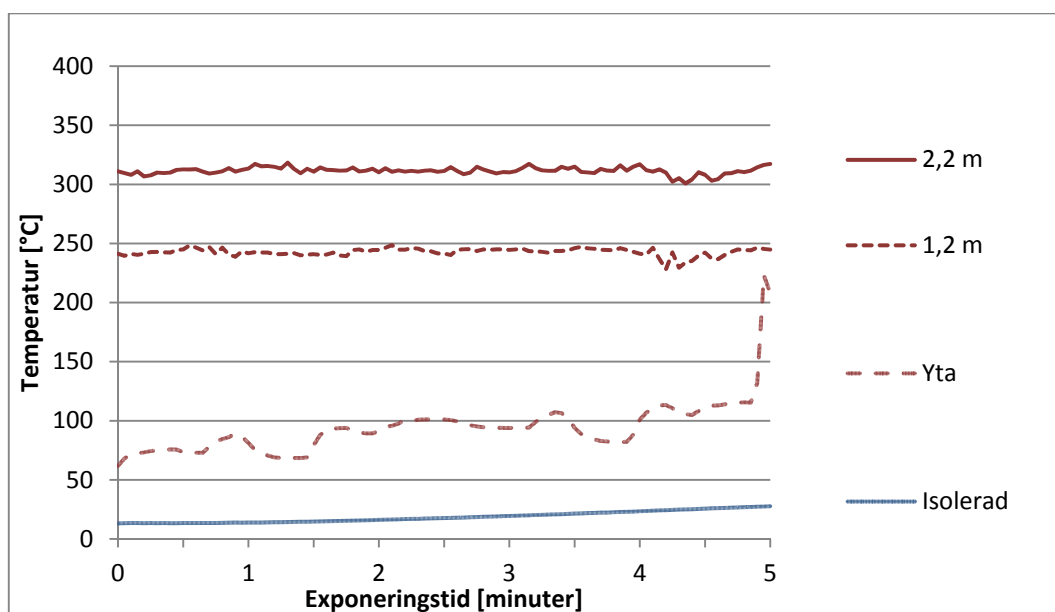
Bilaga G, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med stängda flaskor

I denna bilaga presenteras diagram för varje enskilt försök med stängda flaskor som gjordes enligt Nordtest NT Fire 052. Temperaturer loggades var tredje sekund.

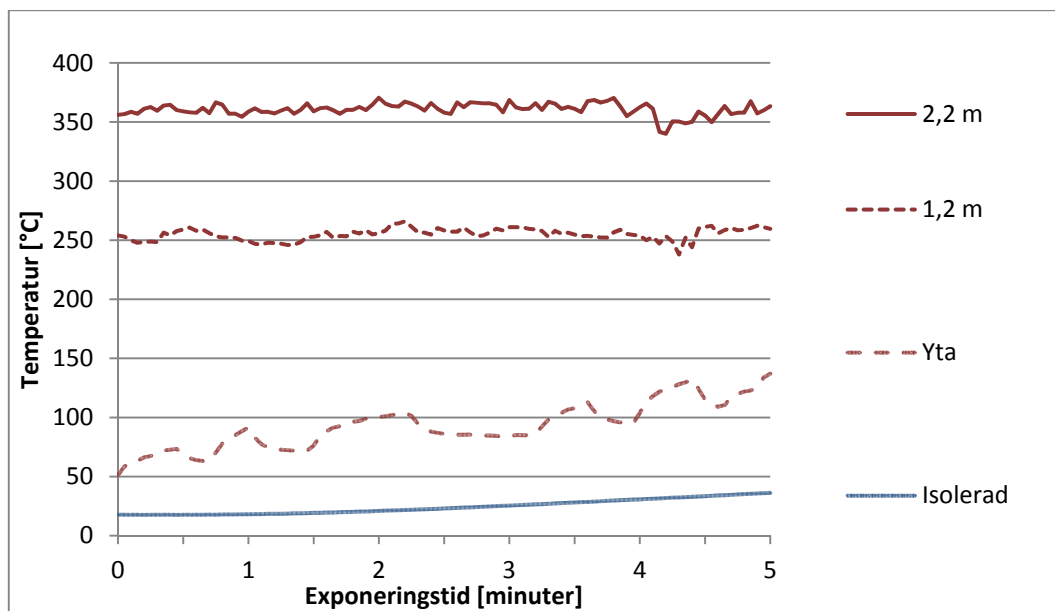
I diagrammen redovisas alla mätpunkter för varje enskilt test. I rapporten visas endast temperaturerna från de isolerade termoelementen.



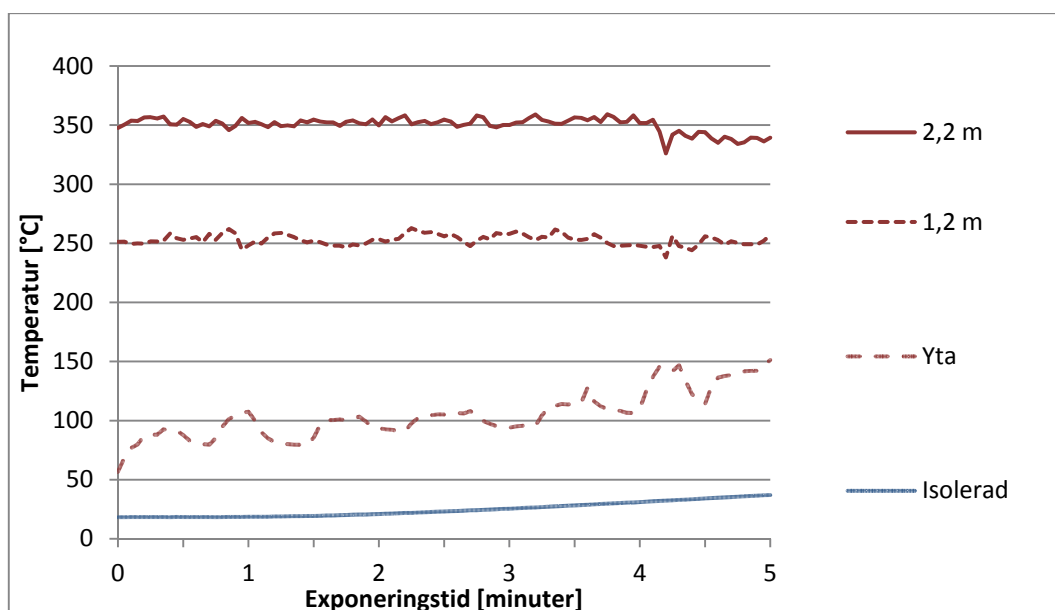
Figur G1. Flaska MSA 1 vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 31,8 °C efter 5 minuter.



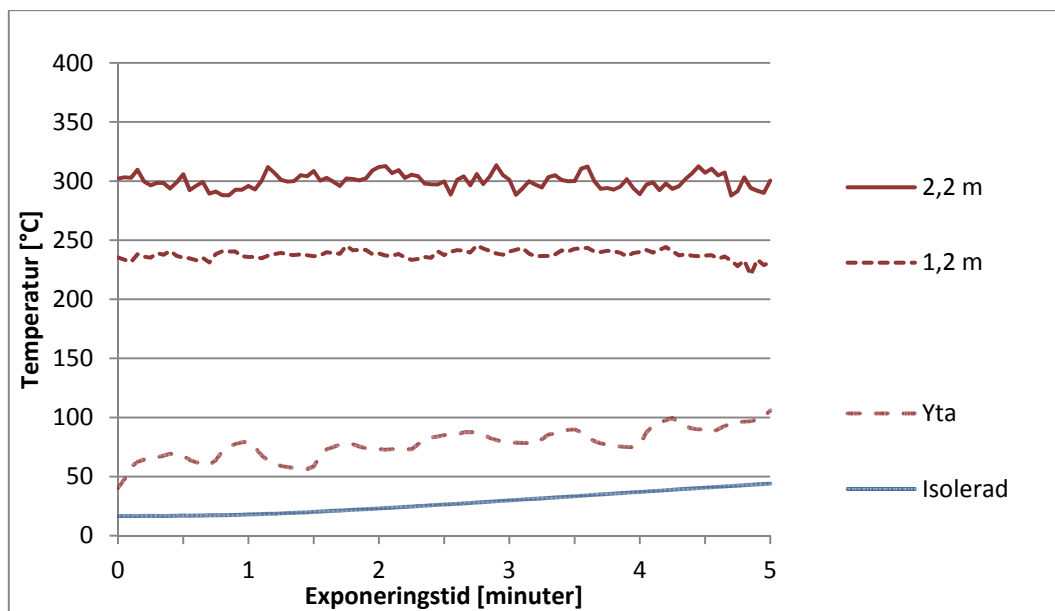
Figur G2. Flaska MSA 2 vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 32,0 °C efter 5 minuter. Termoelementet för mätning av ytemperaturen lossnade från ytan vid tiden 5 minuter och registrerade då en temperatur nära omgivningens.



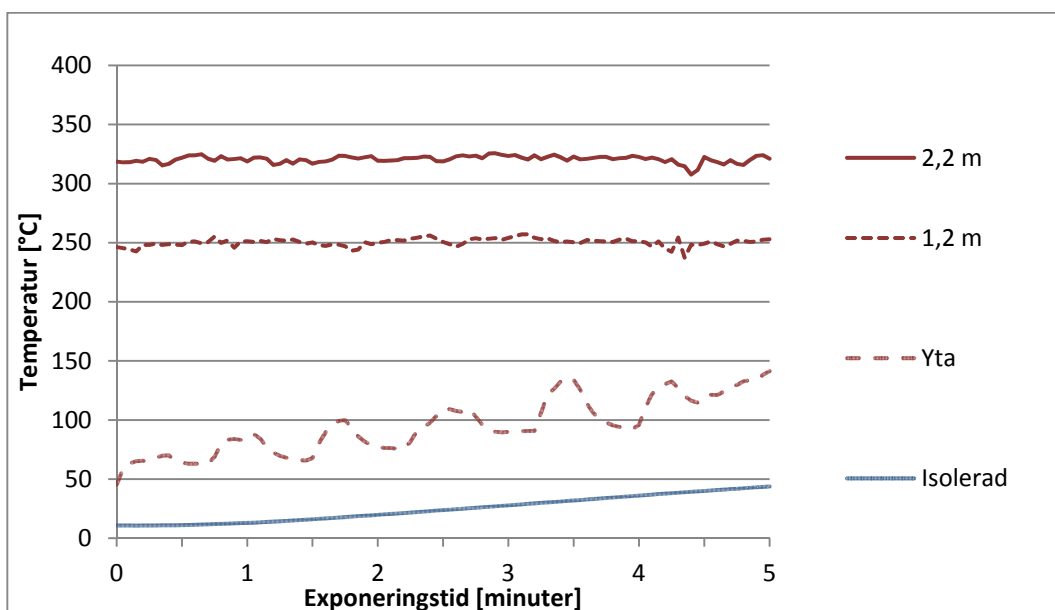
Figur G3. Flaska *Interspiro 1* vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 42,5 °C efter 5 minuter.



Figur G4. Flaska *Interspiro 2* vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 46,2 °C efter 5 minuter.



Figur G5. Flaska *Dräger 1* vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 49,0 °C efter 5 minuter.

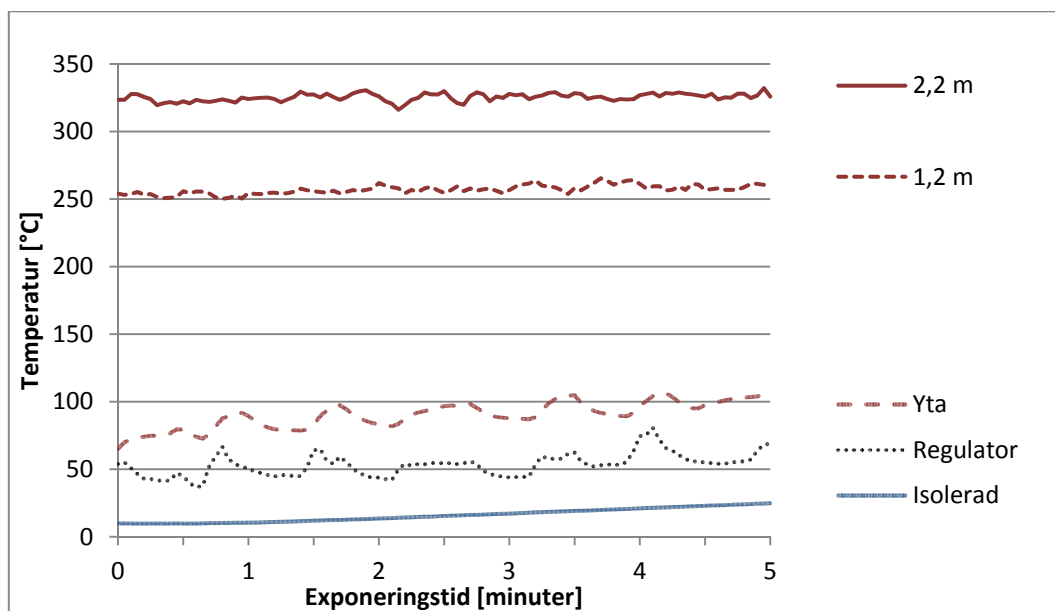


Figur G6. Flaska *Dräger 2* vid test enligt Nordtest NT Fire 052 utan luftuttag där den isolerade mätpunkten når temperaturen 45,5 °C efter 5 minuter.

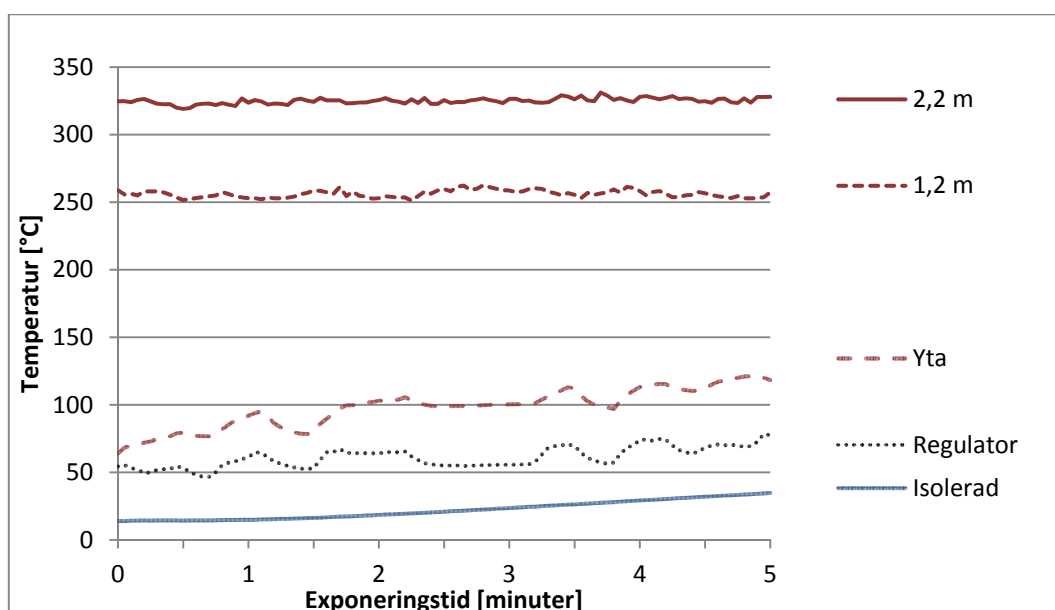
Bilaga H, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med luftuttag 32 l/min

I denna bilaga presenteras diagram för varje enskilt försök med luftuttag om cirka 32 l/min som gjordes enligt Nordtest NT Fire 052. Temperaturer loggades var tredje sekund.

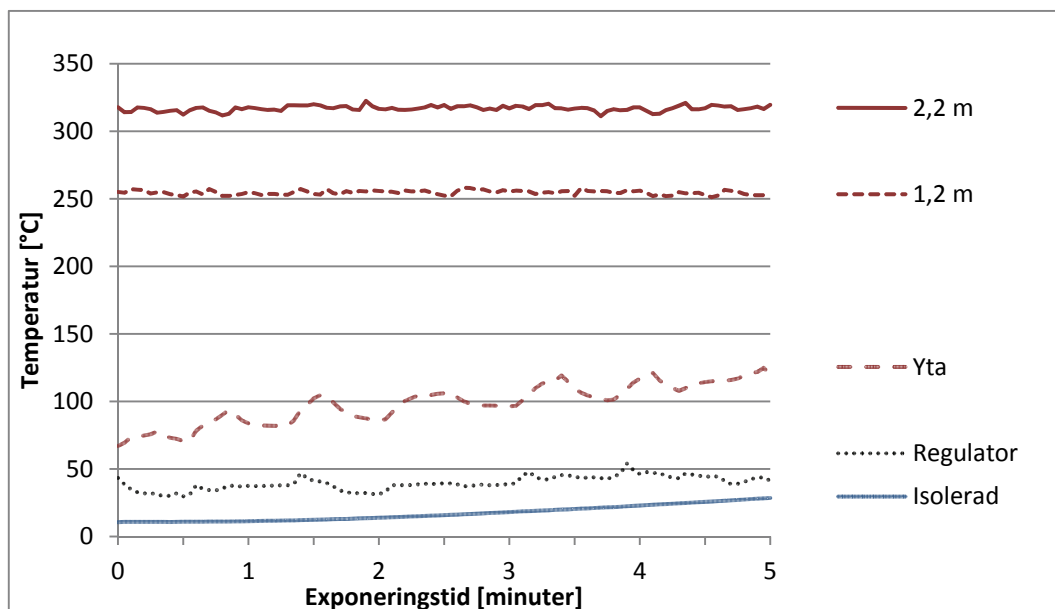
I diagrammen redovisas alla mätpunkter för varje enskilt test. I rapporten visas endast temperaturerna från de isolerade termoelementen.



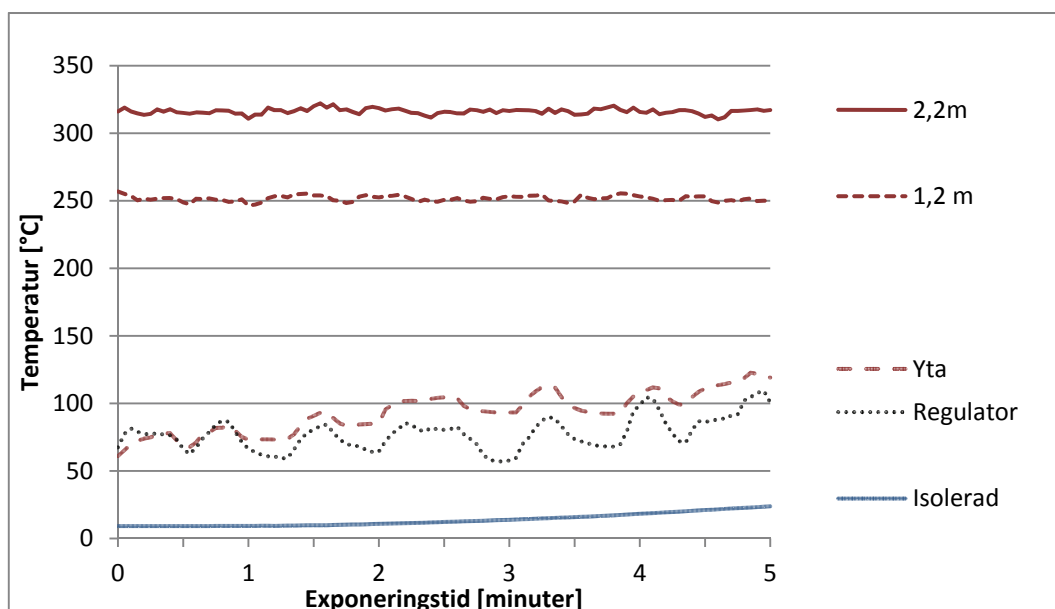
Figur H1. Flaska MSA 1 med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 24,8 °C efter 5 minuter.



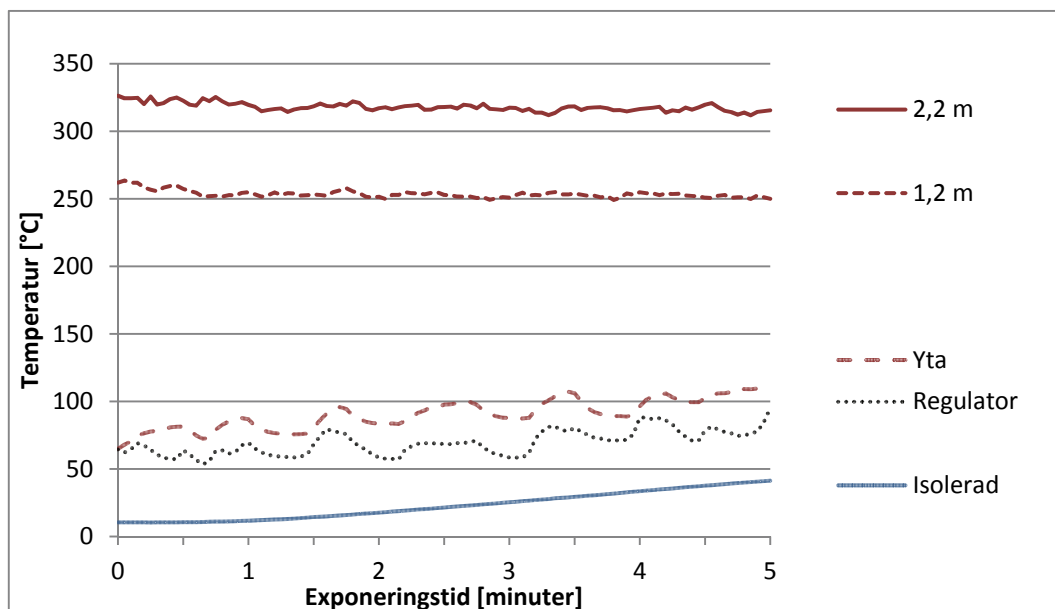
Figur H2. Flaska MSA 2 med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 34,7 °C efter 5 minuter.



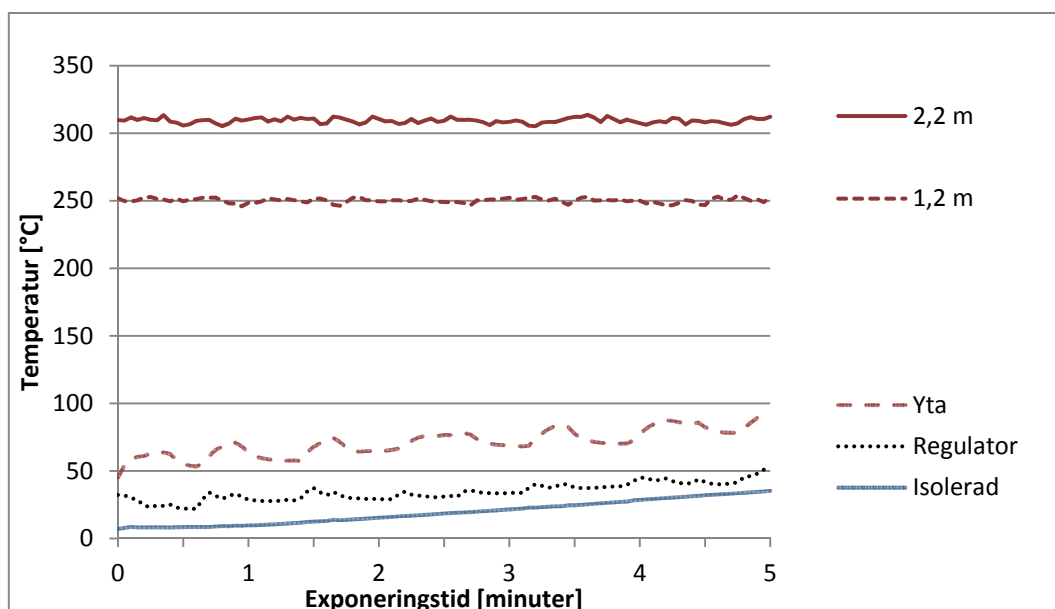
Figur H3. Flaska *Interspiro 1* med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 28,6 °C efter 5 minuter.



Figur H4. Flaska *Interspiro 2* med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 23,8 °C efter 5 minuter.



Figur H5. Flaska *Dräger 1* med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052 där den isolerade mätpunkten når temperaturen 41,4 °C efter 5 minuter.

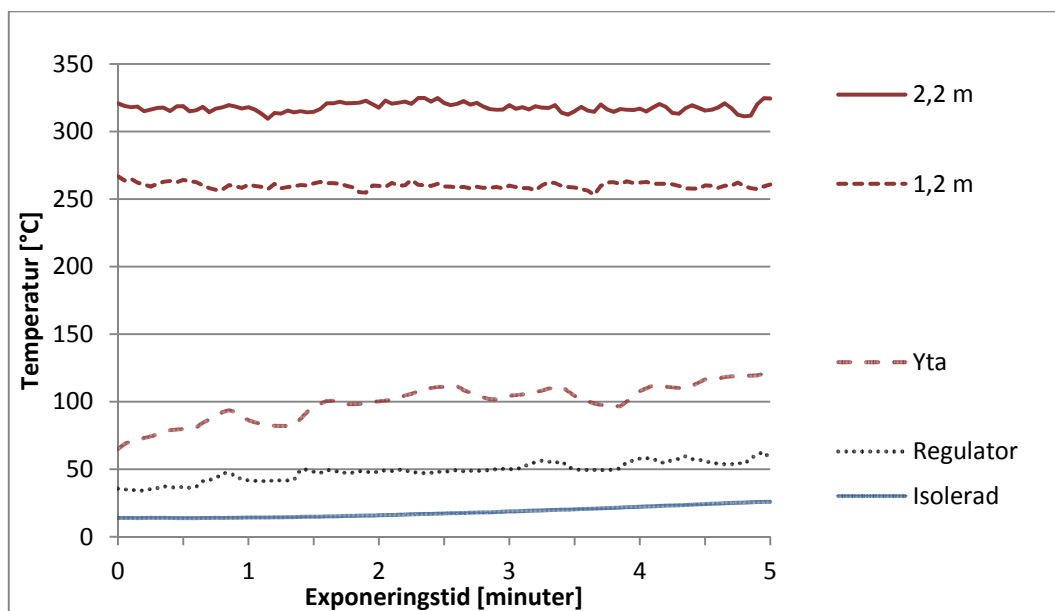


Figur H6. Flaska *Dräger 2* med ett luftuttag på cirka 32 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052 där den isolerade mätpunkten når temperaturen 35,2 °C efter 5 minuter.

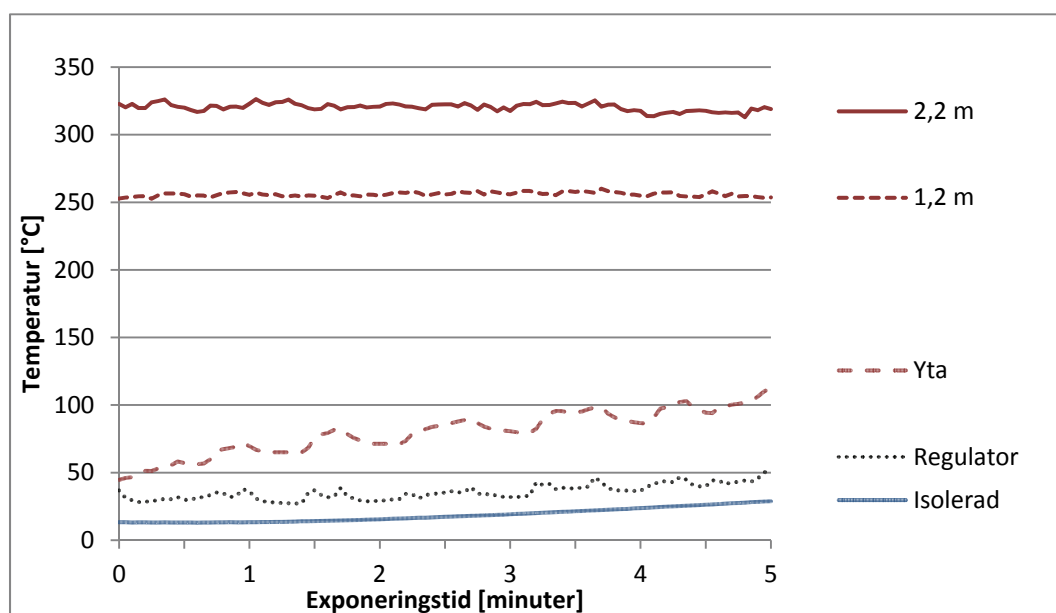
Bilaga I, Försök enligt Nordtest NT Fire 052, med luftuttag 64 l/min

I denna bilaga presenteras diagram för varje enskilt försök med luftuttag om cirka 64 l/min som gjordes enligt Nordtest NT Fire 052. Temperaturer loggades var tredje sekund.

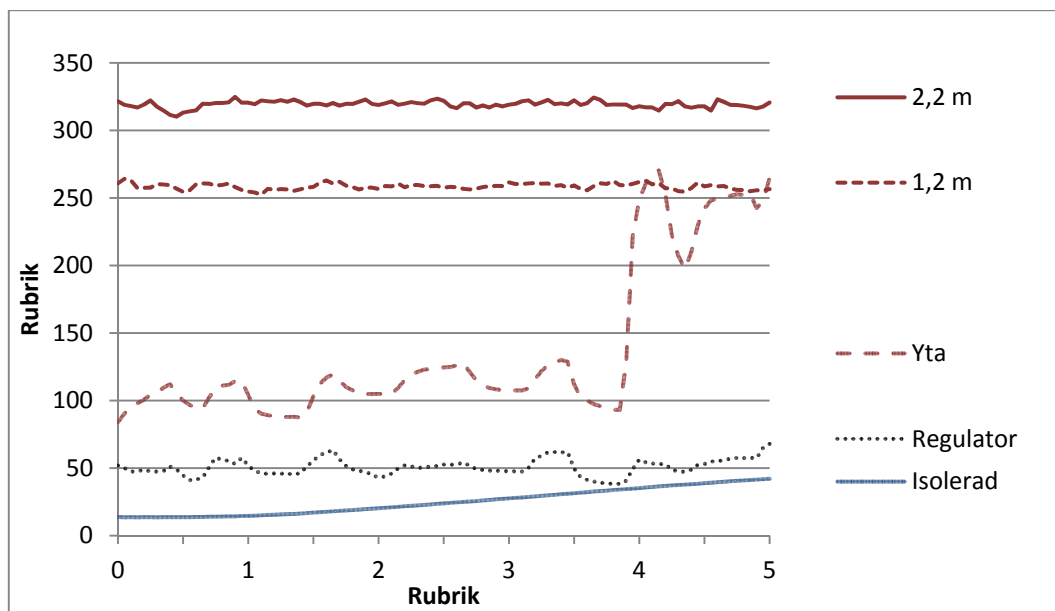
I diagrammen redovisas alla mätpunkter för varje enskilt test. I rapporten visas endast temperaturerna från de isolerade termoelementen.



Figur I1. Flaska *MSA 1* med ett luftuttag på cirka 64 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 25,9 °C efter 5 minuter.



Figur I2. Flaska *Interspiro 1* med ett luftuttag på cirka 64 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 28,8 °C efter 5 minuter.



Figur I3. Flaska *Dräger 1* med ett luftuttag på cirka 64 l/min vid test enligt Nordtest NT Fire 052, den isolerade mätpunkten når temperaturen 42,0 °C efter 5 minuter. Termoelementet för mätning av yttemperaturen lossnade från ytan vid tiden 4 minuter och registrerade då en temperatur nära omgivningens.