

Pyrotekniskt genererade aerosoler

Jonas Ekström
Björn Nilsson
Göran Holmstedt
Patrick van Hees
Johan Åqvist
Anders Gudmundsson

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

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

Report 3145, Lund 2008

Rapport har samfinansierats av BRANDFORSK, företag och myndigheter

Pyrotekniskt genererade aerosoler

**Jonas Ekström
Björn Nilsson
Göran Holmstedt
Patrick van Hees
Johan Åqvist
Anders Gudmundsson**

Lund 2008

Pyrotekniskt genererade aerosoler

Pyrotechnically Generated Aerosols

Jonas Ekström, Björn Nilsson, Göran Holmstedt, Patrick van Hees, Johan Åqvist, Anders Gudmundsson

Report 3145

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB—2145—SE

Number of pages: 86

Illustrations : Jonas Ekström and, Björn Nilsson

Keywords

Pyrotechnically Generated Aerosols, PGA, extinguishing agent, high voltage, electronics, dangerous to health, human safety.

Pyrotekniskt genererade aerosoler, PGA, släckmedel, högspänning, elektronik, hälsofarlig

Abstract

The purpose of the present study was to investigate if pyrotechnically generated aerosols, PGA, used as extinguishing agents cause problems to human safety, are harmful to electronics or have an influence on break down voltage in high voltage circuits. The initial part of the study was a literature review. This was followed by two experimental test series, one in a ½ m³ cabinet and the other in a 26.3 m³ container that enclosed two electronic cabinets. During the test the gas concentrations (CO, CO₂, NH₃), particle concentration and size distribution, light attenuation, sound level, agent release time, extinguishing times, break down voltage and damages to electronics were measured.

The experiments confirmed that; PGA is a very efficient extinguishing agent, by weight 3 to 10 times as efficient as Halon 1301; As the visibility is reduced to near nothing when a PGA is released and that it stays that way for a long time, the concentration of carbon monoxide and ammonia come level with or are slightly above the IDLH value and the particles have the optimal size for depositing in our lungs and have a very high concentration, PGA-system should not be installed in enclosures normally used by people; The pressure build-up when a PGA is released is low; The sound pressure build-up when a PGA is released is well below the demands from the authorities; PGA's did not have any immediate effect on electric circuits even though they were exposed during a long time. PGA lowers the break down voltage but this decrease is well within the limits of the regulations used today.

© Copyright: Brandteknik och riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2008.

Brandteknik och riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund
brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>
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>
Fax: +46 46 222 46 12

Summary

Pyrotechnically Generated Aerosols PGA is a relatively new fire extinguishing agent on the Swedish market and its effects on electronic components and on our health is not fully determined. The purpose of this report is to try to answer some existing questions. Is PGA dangerous to our health? Are harmful levels of bi-products produced? Is the PGA dangerous for electronic components? Is the electric conduction in air enhanced?

Several experiments were conducted with two types of PGA. The experiments were conducted in small-scale at the laboratory of Fire safety Engineering at Lund University and the full-scale experiments at the Swedish rescue service training field in Revinge. The results from this study are:

Extinguishment

- The experiments confirmed that; PGA is a very efficient extinguishing agent, by weight 3 to 10 times as efficient as Halon 1301
- Measurements on visibility confirmed that the visibility is reduced to near nothing when a PGA is activated and that it stays that way for a long time, thus keeping re-ignition of the fire very hard.
- Measurements confirmed that the release time was within the demands of NFPA 2010.
- The full-scale experiments was conducted using a higher concentration of PGA and the purpose of these experiments were to study how PGA-systems works as room-flooding systems, and how it responds to ventilation when penetrating cabinets placed in the protected room. The conclusion of these experiments was that the PGA's were not able to extinguish all fires in the protected room especially the ones placed on the ground, those fires kept burning with a reduced effect. When considering the configuration of PGA-canisters, the conclusion was that with a different set-up of the canisters, both spatial and amount (with the same concentration) all external fires should have been extinguished. One fire kept on burning in the cabinet with forced ventilation, the reason for this is that the installed fan in the cabinet changed the flow of PGA's diverting it from its intended target, the fire. The conclusion drawn from these experiments are that the design of the system, i.e. where and in what direction the canisters are installed, it should work as a good room-flooding system. And that forced ventilation is not always preferable because it can change the direction of flow so the PGA never reaches its target.

Electrical apparatus

- Electronics
Experiments using low voltage circuits were conducted and these circuits were exposed to a pure PGA and a PGA that had extinguished a fire. The results of these experiments show that the PGA's did not have any immediate effect on circuits even though they were exposed during a long time.
- High voltages
The high voltage spark experiments showed that a released PGA lowers the amount of energy needed for a spark to form but that this decrease is well within the limits of the regulations used today.

- A fast clean up of enclosures exposed to PGA is important, if left untouched the PGA will bind moisture and create a sticky paste. According to professionals in the decontamination field, such clean up is fairly easy and is best done by vacuuming or wiping the exposed areas with a damp cloth. However PGA's are new on the market and no such cleaning has never been done, studies on how to clean up decontaminate is therefore required.

Building

- The pressure build-up when a PGA is released was measured and the results show that this pressure do not constitute a danger for constructions.

Human beings

- Measurements on visibility confirmed that the visibility is reduced to near nothing when a PGA is activated and that it stays that way for a long time, thus keeping re-ignition of the fire very hard.
- An analysis of the compounds produced when PGA's are activated showed that the level of CO₂ is far below the IDLH-value. The CO levels are just below the IDLH-value and should be taken under consideration when installing a PGA-system. The NH₃ levels ended up at double the IDLH-value and therefore should be a factor taken unto consideration when a PGA-system is installed. The recommendation will be that a PGA-system should not be installed in enclosures normally used by people.
- The size of particles generated by PGA's was measured and the distribution of size showed that the particles have the optimal size for depositing in our lungs. A study of related literature showed that rats had been exposed to a similar PGA's, but with higher concentration levels and a long exposure time. There were no fatalities amongst the exposed rats and a few of them showed symptoms of pneumonia. Further studies of this subject are required to reach a conclusion on if and how dangerous the particles are to humans. The conclusion of this report is that a PGA-system should not be installed in enclosures normally used by people.

Sammanfattning

Pyrotekniskt genererade aerosoler (PGA) är ett relativt nytt släckmedel på den svenska marknaden och dess effekter på elektroniska komponenter och på vår hälsa är inte fullt utredda. Syftet med denna rapport är att försöka ge svar på några frågor som finns. Är PGA farligt för hälsan? Genereras skadliga halter av restprodukter? Är genererad aerosol skadlig för elektriska komponenter? Ökar utlöst aerosol ledningsförmågan i luft? Hur sanerar man ett utrymme som exponerats för PGA?

Ett flertal försök utfördes med två olika fabrikat av PGA. Försöken utfördes i liten och i full skala, småskaleförsöken i brandtekniks lokaler på LTH och fullskaleförsöken på Räddningsverkets övningsfält i Revinge. Resultaten från studien är:

Släckegenskaper

- Experimenten bekräftade att PGA är ett mycket effektivt släckmedel, per vikt 3 till 10 gånger så effektivt som halon 1301.
- Siktbarhetsförsöken bekräftade att sikten omedelbart blir obefintlig när en PGA aktiveras och att den förblir så under mycket lång tid. Detta medför emellertid att återantändningsskyddet är gott.
- Mätningarna bekräftade att utlösningstiden för PGA var inom de krav som ställs i NFPA 2010.
- Fullskaleförsöken utfördes med en högre dimensionerande koncentration och syftet med försöken var att undersöka huruvida ett PGA system kan fungera som ett rumskydd samt hur forcerad och naturlig ventilering av elskåp påverkar inträngningsförmågan till skåp i det skyddade rummet. Resultaten gav att PGAerna inte släckte alla bål i det skyddade rummet eller i det skåp som försetts med forcerad ventilation. De bål i rummet som inte släcktes var lågt placerade och brann vidare med reducerad effekt efter utlösning av PGA. Efter de inledande försöken konstaterades det att med en annorlunda konfiguration av PGA behållarna så hade även dessa bål släckts. I skåpet med forcerad ventilation brann bålet som var placerat högst upp vidare, detta förklaras med att fläkten var placerad i toppen av skåpet och det aktuella bålet var placerat så att flödet av aerosol aldrig nådde detta bål. Slutsatsen blir att med rätt antal PGA behållare placerade på rätt sätt kan ett PGA system fungera som ett fullgott rumskydd och att forcerad ventilation inte alltid är att föredra då en fläkt kan ändra flödet i ett skåp så att aerosolen aldrig når det tänkta målet.

Verkan på elektrisk apparatur

- Försök med svagströmskretsar genomfördes och dessa kretskort exponerades både för ren PGA och en PGA som fått släcka en flamma. Resultaten av dessa försök visar att aktuella PGAer inte har någon omedelbar påverkan på kretskort trots att korten exponerades under lång tid.
- Försöken med överslag av högspänning visade på att utlöst PGA sänker spänningsnivån som krävs för att ett överslag skall ske, men denna sänkning är väl inom ramen för dagens regelverk och är således försumbar.
- En snabb sanering av utrymmen som exponerats för PGA är viktigt då PGA binder fukt till sig och bildar en klibbig pasta. Enligt fackmän på området utförs en sanering enklast

genom att dammsuga eller genom att torka av med en fuktig trasa. Men då PGA är nytt på marknaden har ingen verklig sanering utförts, studier på ämnet bör således genomföras.

Verkan på byggnader

- Mätningar av tryckuppbyggnaden vid utlösning av den aktuella koncentrationen gav att tryckuppbyggnaden inte är av den storleksordning att en konstruktion skadas. Tryckuppbyggnaden var helt enkelt väldigt liten.

Verkan på människa

- Siktbarhetsförsöken bekräftade att sikten omedelbart blir obefintlig när en PGA aktiveras och att den förblir så under mycket lång tid. Den dåliga sikten försvårar en eventuell utrymning.
- En analys av de produkter som bildas när aktuella PGA utlöses, både med släckande och utan släckande av en flamma, visade att halterna av CO₂ ligger långt under IDLH nivån. CO halterna hamnade strax under IDLH och bör således beaktas vid framtida installationer. NH₃ halterna hamnade på dubbla IDLH och bör därför bli den dimensionerande faktorn när en PGA installation skall ske. Rekommendationen blir att ett PGA system inte skall installeras i utrymmen där personer normalt vistas.
- Partikelstorleken mättes och storleksfördelningen visade sig vara optimal för deponering i lungorna, litteraturstudier gav att försök med liknande PGA har utförts på råttor, dessa exponerades för höga koncentrationer under lång tid och inga dödsfall rapporterades. En liten del av råttorna visade symptom på lunginflammation efter exponeringen däremot inga andra allvarliga symptom. Här krävs det mer studier för att klargöra huruvida PGA är skadligt för människor, återigen blir rekommendationen att ett PGA system ej skall installeras i utrymmen som personer normalt vistas i.
- Vidare gav resultat från mätningar av den ljudnivå som alstras vid utlösning av aktuella PGA att ljudnivån inte överstiger arbetsmiljöverkets nivåer för skadliga ljud.

Innehållsförteckning

Summary	7
Sammanfattning	9
Innehållsförteckning	11
Inledning	13
Syfte	13
Bakgrund.....	13
1 Beskrivning av pyrotekniska aerosoler.....	15
1.1 Aerosolers alstring och distribution	15
1.1.1 Dispersionsmetoden	15
1.1.2 Kondensationsmetoden	15
1.2 Släckegenskaper hos aerosoler.....	15
1.3 Dimensioneringsprinciper	16
1.4 Standarder och regelverk	17
1.4.1 Risker med resin.....	17
1.5 Ansökan om godkännande av explosiv vara hos Räddningsverket (blivande Myndigheten för samhällsskydd och beredskap)	17
2 Tidigare studier.....	18
2.1 USCG (US Coast Guard) [2]	18
2.1.1 Försök.....	18
2.1.2 Insamlade data.....	18
2.1.3 Resultat.....	18
2.2 Guo Hongbao och Yue Dake [9].....	18
2.2.1 Beskrivning	18
2.3 Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning - en litteraturstudie, SP [1].....	19
2.3.1 Beskrivning	19
2.4 Smith et al [15].....	19
3 Ingående aerosoler.....	20
3.1 Användningsområden	20
3.2 Innehåll, utlösning och förvaring	20
3.2.1 Produkt A	20
3.2.2 Produkt B	20
4 Beskrivning av försöksuppställningar	21
4.1 Småskaleförsök	21
4.1.1 Utlösningstid	21
4.1.2 Skada på dator	21
4.1.3 Elektrisk ledningsförmåga.....	22
4.2 Påverkan på överslagsspänning -	22
4.2.1 Tryckuppbyggnad.....	23
4.2.2 Siktbarhet	23
4.2.3 Ljudnivå	23
4.2.4 Partikelstorlek och masskoncentration.....	24
4.2.5 Kemisk komposition	24
4.2.6 Gaskoncentration.....	25
4.3 Storskaleförsök	26
4.3.1 Släckförsök.....	26
4.3.2 Temperaturmätningar	26
5 Resultat.....	27
5.1 Småskaleförsök	27

5.1.1	Utlösningstider	27
5.1.2	Skada på dator	27
5.1.3	Elektrisk ledningsförmåga.....	27
5.1.4	Påverkan på överslagsspänning.....	28
5.1.5	Tryckuppbyggnad.....	28
5.1.6	Siktbarhet	28
5.1.7	Ljudnivå	28
5.1.8	Partikelstorlek och masskoncentration	29
5.1.9	Kemisk komposition	29
5.1.10	Gaskoncentration av koldioxid och kolmonoxid.....	29
5.1.11	Gaskoncentration av ammoniak	30
5.2	Storskaleförsök	30
5.2.1	Släckförsök.....	30
5.2.2	Temperaturmätningar	33
6	Diskussion.....	34
6.1	Skada på dator.....	34
6.2	Elektrisk ledningsförmåga	34
6.3	Påverkan på överslagsspänning	34
6.4	Tryckuppbyggnad	34
6.5	Utlösningstider.....	35
6.6	Siktbarhet	35
6.7	Partikelstorlek och masskoncentration.....	35
6.8	Kemisk komposition	36
6.9	Gaskoncentration	36
6.10	Ljudnivå	37
6.11	Storskaleförsök	37
7	Sanering.....	38
	Referenser	39
	Bilaga A – Instruktion till hur man ansöker om godkännande av explosiv vara	41
	Bilaga B – Högspänningstest	45
	Bilaga C – Försöksuppställning vid släckförsök.....	46
	Bilaga D - Resultat från småskaleförsöken	51
	Svagströmsförsök	51
	Utan släckning	51
	Med släckning	55
	Ljudnivå	58
	Tryckuppbyggnad	59
	Utlösningstid.....	60
	Partikelstorlek och masskoncentration.....	61
	Bilaga E – Resultat från högspänningsförsök.....	63
	Bilaga F - Resultat från fullskaleförsöken.....	65
	Släckförsök av utvändiga bål	65
	F.2 - Släckförsök av invändiga bål.....	66
	Temperaturmätningar i containern.....	67
	Bilaga G – Sikttabell.....	68
	Bilaga H - Aerosol measurements and health effects of pyrotechnically generated aerosols...	
	Separat numrering sid 1-16.....	

Inledning

Syfte

Aerosoler utgörs av fasta eller vätskeformiga partiklar som är fördelade i en gas. Med pyrotekniskt genererade aerosoler (Benämns i fortsättningen PGA) menas en substans i fast fas som bildar upphettad ånga. När ångan kyls kondenserar den och en aerosol med små partiklar bildas.

Det finns fastställda fördelar och nackdelar med pyrotekniskt PGA. Den största fördelen är den höga släckeffektiviteten per viktenhet, mellan 3 – 10 gånger mer effektivt än Halon [1] och den största nackdelen är den mycket begränsade siktbarheten i utrymmet efter utlösning av ett system [2]. Därför är PGA endast godkända för obemannade utrymmen enligt den så kallade SNAP-listan [3] som anger släckmedel som av US EPA (Environmental Protection Agency) är godkända som halonersättningsmedel. Även NFPA har nyligen utkommit med en standard för aerosolsläckmedel [4]. Behovet av ett enkelt, viktmässigt fördelaktigt, effektivt släckmedel för obemannade utrymmen är stort. I Sverige har dock efterfrågan hittills varit liten [5]. Outredda faktorer som toxicitet, släckförmåga och restskador är de primära orsakerna. Enligt Bradford Colton [6] har PGA inte heller fått något stort genomslag i USA, till stor del på grund av osäkerhet angående ovanstående faktorer. Enligt honom resonerar många brandskyddsansvariga att det skall vara ställt utom tvivel att PGA inte skadar elektronik och annan utrustning innan det kan komma ifråga.

Aktuellt projekt avser att genom litteraturstudier, toxicitetstester samt fullskaleförsök undersöka olika PGA produkters lämplighet som släckmedel i olika applikationer.

Bakgrund

Halon förbjöds i Sverige som släckmedel 1997-12-31 till följd av dess negativa miljöpåverkande egenskaper. Halon påverkar både ozonskiktet och bidrar till växthuseffekten. Halon användes tidigare i mycket stor utsträckning i utrymmen där ett rent släckmedel krävdes, t ex i utrymmen med elektrisk utrustning. I de fall halon ersattes med en gas valdes oftast antingen en så kallad HFC-gas eller en inert gas. HFC-gasen släcker branden snabbt men bidrar till växthuseffekten. En inertgas är mer miljövänlig än HFC-gaser men tar mycket lagringsutrymme i anspråk och släcker branden långsammare (relativt HFC-gaser).

Vid val av släcksystem/släckanordning behöver kravställaren rangordna de egenskaper som ska tas hänsyn till och det slutgiltiga valet blir en kompromiss på ett eller flera områden. Om miljöegenskaperna avseende gasen är viktiga och utrymme för gasflaskor finns så väljs ofta ett inertgassystem. Om snabb släckning efterfrågas och mindre utrymme finns att tillgå för gasflaskorna så väljs ofta en HFC-gas.

I många fall består skyddsobjektet av mindre obemannade utrymmen på svåråtkomliga platser innehållande elektronik t ex elkopplingskåp, motorer, transformatorstationer, kabeltunnlar och kontrollrum. För dessa utrymmen krävs ett effektivt släckmedel som är enkelt, utrymmeseffektivt och som inte orsakar skador på elektronik eller miljö. PGA kan ha dessa egenskaper.

Brandforsk har tidigare finansierat projektet *Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning – en litteraturstudie* [1], som genomfördes och publicerades 2001. Författarna till ovan nämnda projekt skriver att fortsatta insatser bör inriktas mot fördelning, släcktider och kvarvarandetider av släckmedlet i rummen samt att utreda hälsoaspekterna.

I Brandforsk's forskningsprogram 2006-2008 står att gaser, pulver och aerosoler har som släckmedel stora likheter. Aerosoler är ofta så finfördelade att de följer med gasströmmar, det vill säga i stort betar sig som ett gasformigt släckmedel. Behovet av ny kunskap varierar mellan de olika släckmedlen, men viktiga aspekter är fördelning av släckmedlet i brandrummet, tryckuppbyggnad i brandrummet, läckage av släckmedel ut ur brandrummet, dvs det vill säga återantändningsrisker, dimensionerande släckkoncentration, toxicitet och termiska nedbrytningsprodukter, restskador och saneringsbehov.

På senare tid har också intresset för ett miljövänligt alternativ ökat på grund av att HFC-gasers framtid blir alltmer oviss på grund av dess miljöpåverkan.

U.S. Coast Guard genomförde ett antal testserier [2] i syfte att undersöka huruvida olika produkter uppfyllde MSC/Circ.1007 Riktlinjer för godkännande av aerosolsystem i motorrum på fartyg. Studien visar att släckeffektiviteten var goda för samtliga system avseende vätskebrand. Inget av systemen lyckades dock släcka träribbstaplar med lång förbrinntid. Kvarhållandetiderna av aerosolerna var godkända. Författarna föreslog att IMO minskar förbrinntiden för träribbstaplar och minskar storleken på vätskebränderna då det var svårare för en PGA att släcka en liten brand jämfört med en större. Sammanfattningsvis visar studien att PGA är intressant som släckmedel.

Andra tänkbara användningsområden för PGA är [1]

- Motorutrymmen, maskinrum
- Kommersiella och militära flygapplikationer (dry bays, cargo compartements)
- Militära fordon t ex maskinrum
- Förrådsutrymmen inom industri och handel
- Maskiner och automatisk utrustning

Pontus Nordberg på Försvarets materielverk bekräftar [7] att ett omfattande potentiellt användningsområde är motorutrymmen på militära fordon och maskinrum på Försvarets fartyg. Även dry bays på flygplan är intressant och finns i dagsläget installerat på vissa amerikanska militärflygplan [6]

1 Beskrivning av pyrotekniska aerosoler

Nedan redogörs för några begrepp och en del teori rörande pyrotekniska aerosolsläckmedel.

1.1 Aerosolers alstring och distribution

En aerosol består av mycket små, i storleksordningen nano- till mikrometer, fasta eller vätskeformiga partiklar som är fördelade i en gas. Dessa partiklar kan skapas och distribueras genom, i huvudsak, två olika metoder: dispersion- och kondensationsmetoden.

1.1.1 Dispersionsmetoden

Dispersionsmetoden går ut på att en fast substans mals ned till önskad kornstorlek. Pulvret trycksätts i en tryckbehållare med gas, vanligtvis en inertgas. Gasen har som funktion att driva ut pulvret ur behållaren, sprida pulvret samt, i de fall där en inertgas används, agera som ytterligare en släckande komponent i aerosolen som bildas. Detta är i stort samma princip som används i pulversläckare där den huvudsakliga skillnaden ligger i att pulver i vanliga släckare har en större kornstorlek än den i aerosolbildande system. [1]

1.1.2 Kondensationsmetoden

Denna metod består i att en fast substans antänds vilket bildar en ånga. Substansen består av ett finfördelat pulver, bindemedel, oxidationsmedel och ett förtunningsmedel. När ångan drivs ut ur sin behållare genom den termiska expansionen får den passera ett kemiskt och/eller fast kylsystem (t.ex. ett finmaskigt nät som absorberar värme från ångan) som resulterar i att ångans temperatur sjunker och då övergår till fasta eller vätskeformiga partiklar. Fördelen med detta system är att det inte kräver några tryckbehållare eller ledningar utan aerosolgeneratoren kan installeras direkt i utrymmet som skall skyddas.

Kondensationsgenererade aerosoler dominerar marknaden [1] och det är endast denna typ som undersöks i detta arbete.

1.2 Släckegenskaper hos aerosoler

Släckverkan från aerosoler sker dels genom att partiklarna absorberar värme från flammen samt genom att bryta in i de kemiska reaktionerna som gör flammen möjlig, så kallad heterogen katalys. Den fasta substansen består huvudsakligen av någon form av kaliumförening och kaliumradikaler är mycket aktiva vilka då avbryter de kemiska förbränningsreaktionerna genom neutralisering av väte-, syre- och hydroxidradikaler i flammen. Gasdelen av aerosolen har dessutom en inerterande effekt [1]. Sammansättningen i aerosolen, dvs. förhållandet mellan gas och partikelfas varierar med aerosolfabrikant.

Dessa reaktioner, och den värmeabsorberande effekten, ökar båda med en förminskning av partiklarnas diameter. En mindre diameter ger partiklarna större yta per viktenhet vilket leder till effektivare värmeabsorption och snabbare kemisk inverkan då små partiklar bryts ned snabbare än stora. Då aerosoler består av just mycket små partiklar i en gas så blir resultatet ett effektivare släckmedel än konventionellt pulver.

En annan viktig egenskap hos aerosoler är att fallhastigheten hos partiklarna minskar med en mindre diameter då ytan blir stor i förhållande till massan vilket gör att luftmotståndet blir relativt stort i förhållande till gravitationskraften. Detta resulterar i att partiklarna håller sig svävande under en längre tid och bidrar därmed till en längre inerteringstid. På så vis får man ett bättre återantändningsskydd. [8]

I och med att partiklarna håller sig svävande så är det också naturligt att de följer luftströmmarna. Detta är en viktig egenskap då detta gör det möjligt för aerosolsläckmedel att släcka flammor i utrymmen som t.ex. ett konventionellt sprinklersystem inte skulle nå, t.ex. in under ett bord eller liknande. Nackdelen är att då partiklarna följer luftströmmarna så blir det svårt att fördela aerosolen jämnt. Detta kan bli ett problem, framför allt med lågt placerade bränder då aerosolen är upphettad vid utlösningen och därmed vill stiga uppåt p g a den termiska drivkraften. [2]

Tillsammans gör dessa faktorer att PGA blir ett mycket effektivt släckmedel. Släckverkan per viktenhet är i spannet 3-10 gånger effektivare än Halon. [1]

1.3 Dimensioneringsprinciper

Hur systemen dimensioneras är helt beroende av vad som skall skyddas och vilka typer av bränder som kan tänkas inträffa. Försök visar att större vätskebränder är lättare att släcka än små och att bränder i fibrösa material är svårsläckta med låga koncentrationer av PGA [2].

Beroende på utrymmets storlek, hinder, typ av brand och ventilerings rekommenderas olika kompensationsfaktorer. Studier utförda av SP [1], USCG [2] och G. Hung bao och Dake [9] visar alla på samma princip när det gäller dimensionering.

$$M = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot V \cdot Q$$

Där M är mängden PGA (g), K_{1-3} är kompensationsfaktorer, V är inneslutningens volym (m^3) och Q är den dimensionerande släckkoncentration (g/m^3).

Fabrikanter använder olika metoder för att bestämma designkoncentrationen. Av de PGA som används i försöken nedan använder fabrikat kallat A "netto metoden", dvs. mängden släckmedel bestäms genom viktmätning före och efter utlösning av släckmedlet. Fabrikat B använder sig av en annan metod, man multiplicerar vikten före utlösning med faktorn 0.7692 för alla storlekar av släckmedelsbehållare. Ger tester med olika stora behållare olika släckkoncentration sätts designkoncentrationen till den behållare som kräver högst koncentration.

Mängden "nettosläckmedel" som utlöses kommer alltid att variera något från modell till modell på grund av förluster då aerosolen passerar kylningsbädden mm. Underwriters Laboratories har krav på att variationen från test till test dvs. en släckare kan underkännas om variansen är för stor även om testbränderna släcks.

1.4 Standarder och regelverk

Det finns ett flertal internationella standarder rörande pyrotekniskt genererade aerosoler. NFPA 2010 [4] reglerar vad en PGA är och hur den skall och får installeras med avseende på hälsa och strukturella egenskaper.

European technical report [10] beskriver liksom NFPA 2010 vad en PGA är. Dessutom beskrivs även den testprocedur som skall genomföras för att PGAn skall bli godkänd som släckmedel i EU.

Vid LTH och Revinge försöken dimensionerades systemen inte enligt någon av ovanstående standards eftersom beställaren av försöken ville testa specifika egenskaper hos PGAn som elektrisk ledningsförmåga etc.

Regelverkens riktlinjer och bestämmelser kommer att kommenteras vidare i anslutning till resultaten i kapitel 6.

1.4.1 Risker med resin

Resinerna som används som bindemedel i behållare med PGA av båda de testade märkena är klassade som en F2-substans enligt den franska tågtrafiksnormen NFF 16 101 som har nått stor acceptans inom EU. F-klassningen är en sammanvägning av en produkts rökpotential och toxicitet och klassningen sker i sex steg mellan F0-F5 där F5 är värst ur rökpotential- och toxicitetsperspektiv. Just klassen F2 accepteras för bland annat säten i tåg och då det i ett tågset rör sig om betydligt större mängder resin än i PGA-behållare så bedöms inte detta bidra till en nämnvärt högre risk i samband med användandet av aerosolsläcksystem.

1.5 Ansökan om godkännande av explosiv vara hos Räddningsverket (blivande Myndigheten för samhällsskydd och beredskap)

För att få importera eller tillverka en explosiv vara till/i Sverige så måste produkten vara godkänd av Räddningsverket (blir vid årsskiftet 2008-2009 en ny myndighet, se rubriken). Ansökan skall innehålla en redogörelse för varans konstruktion, användningsområde m.m. Vill man åberopa certifikat, tester och klassificeringar från andra länder skall dessa bifogas ansökan. För mer detaljer rörande ansökan, se Bilaga A.

2 Tidigare studier

Nedan presenteras en kort beskrivning av ett antal genomförda studier inom området.

2.1 USCG (US Coast Guard) [2]

2005 Utförde USCG en serie med försök avseende släckförmåga, sikt, säkerhetsavstånd, temperatur, tryck tömmningstid m.m. enligt IMO MSC/Circ. 1007. Resultaten presenterades i den tekniska rapporten "An Evaluation of Aerosol Extinguishing Systems for Machinery Space Applications"

2.1.1 Försök

I ett maskinrum ombord på en båt (500m³) utfördes en serie om totalt 18 försök med tre olika typer av aerosol, varje typ av aerosol testades i 4 olika scenarier: Typbrand, Klass A och B bränder, stora poolbränder och dolda utrymmen. Bränderna var av storleksordningen 1kW – 6MW.

2.1.2 Insamlade data

De data som samlades in vid försöken var medeltemperatur i utrymmet, temperatur på aerosolbehållaren, systemets utlösningstid, släcktid, återantändningsskydd, temperatur på utströmmande aerosol, CO, CO₂ och O₂ halter i utrymmet, olika densiteter och sikt.

2.1.3 Resultat

Resultaten visar att de tre typerna av aerosol har liknande förmågor i alla avseenden. Förmågan att släcka klass- B bränder överträffar alla tillverkarnas dimensionerande värden däremot visar resultaten på en dålig släckförmåga av klass- A bränder. Sikten försämras momentant till i stort sett obefintlig för alla 3 produkterna. Återantändningsskyddet bedömdes i alla fall av klass- B bränder till ca 20 minuter. Jämförelser mellan resultaten från USCG undersökning och resultaten från LTH försöken går att läsa i denna rapport.

2.2 Guo Hongbao och Yue Dake [9]

I rapporten Aerosol Fire Extinguishing Technology [9] behandlas två olika typer av pyrotekniskt genererade aerosoler, så kallade S- och K-klass. S-klass är Strontiumbaserade och K-klass är Kaliumbaserade.

2.2.1 Beskrivning

Rapporten behandlar generella egenskaper hos pyrotekniskt genererade aerosoler, släckegenskaper, sedimentering, toxicitet, skillnaden mellan S- och K- klass aerosoler samt miljöpåverkan.

2.3 Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning - en litteraturstudie, SP [1]

2.3.1 Beskrivning

Rapporten beskriver aerosolers egenskaper med avseende på kemisk sammansättning av det oxiderande materialet, den bildade aerosolens sammansättning, utströmningstemperatur, partikelstorlek, sikt, släckeffekt, korrosion, hälsa och miljö mm.

2.4 Smith et al [15]

I denna studie så utsattes testråttor för koncentrationer av 50 respektive 80 g/m³ under 15 respektive 60 minuter. Råttorna undersöktes ett antal gånger under en period av 14 dagar. Varje testgrupp bestod av 14 djur.

Group	SFE load (g/m ³)*	Exposure time (min)	Post-exposure investigation time points (time after exposure)				
			1 h	6 h	24 h	7 days	14 days
1	Control, not exposed	60	14***	14	14	14	14
2	50	15	14	14	14	14	14
3	50	60	14	14	14	14	14
4	80	15	14	14	14	14	14
5	80	60	14	14	14	14	14

Table 2.1. Study design, Smith et al 1997

Samtliga försöksdjur i grupp 2-5 (se Tabell 2.1 ovan) uppvisade andningssvårigheter, slöhet och förvirring direkt efter exponeringen men återhämtade sig till synes sig när de fick andas frisk luft. Efter sju dagar kunde inga negativa effekter av exponeringen observeras.

Vid obduktion kunde man i den mest exponerade gruppen finna tecken på lungödem och lunginflammation. Det diskuteras i studien att exponeringen för stora koncentrationer kaliumklorid kan störa den elektrolytiska balansen vilket resulterar i lungödem.

3 Ingående aerosoler

I detta projekt har två olika fabrikat av aerosoler använts. Nedan presenteras lite fakta om dessa.

3.1 Användningsområden

Båda fabrikaten anges vara användbara för A¹, B² och C³-bränder. Gemensamt för båda fabrikaten är att de inte användas vid bekämpning av brand i:

- Djupt sittande glödbärder i klass A
- Metallpulver
- Metallhybrider
- Kemikalier som kan glöda eller brinna utan syretillförsel
- Reaktiva metaller som t.ex. litium, magnesium m.fl.

För produkt B anges även en olämplighet för användning i starkströmsanläggningar med en spänning större än 40 000 Volt.

3.2 Innehåll, utlösning och förvaring

Nedan följer lite kortfattad data om de olika fabrikaten.

3.2.1 Produkt A

Utlösningmekanism	Elektrisk Termisk
Släckande substans	Kaliumnitrat (77%)
Övriga kemikalier	Kalimkarbonat (4%) Magnesium (1%) Epoxy Resin (18%)
Förvaringstemperatur	-50 till 50° C
Förvaringsfuktighet	98%

Table 3.1. Product data, product A.

3.2.2 Produkt B

Utlösningmekanism	Elektrisk Termisk (separat tillbehör)
Släckande substans	Kaliumnitrat
Övriga kemikalier	Dicyandiamid Organiskt resin
Förvaringstemperatur	-54 till 54° C
Förvaringsfuktighet	95% RH

Table 3.2. Product data, product B.

¹ Fasta material som tex. trä, papper, papp, plast m.m.

² Brännbara vätskor som t ex bensin, fotogen m.m.

³ Spänningssatt utrustning som t ex datorer, kretskort, transformatorstationer m.m.

4 Beskrivning av försöksuppställningar

Försöken genomfördes i brandtekniks laboratorium i LTH och vid räddningsverkets skola i Revinge. I de försök där datalogg användes kopplades mätinstrument via olika datalogger, implog och picolog till en dator. Dessa loggverktyg kan ställas in för att mäta olika signaler som temperatur och spänning under olika tidsintervall, mellan millisekunder och sekunder.

4.1 Småskaleförsök

Samtliga småskaleförsök utfördes på LTH och i en för försöken konstruerad låda. Lådan konstruerades med ett normalstort elskåp som förebild, dess volym var $0,5 \text{ m}^3$. Konstruktionen bestod av en regelstomme klädd med 9 mm gipsskivor och den tätades med fogmassa för att minimera läckage. En sida av lådan lämnades fri från gips för att lätt åtkomst till försöksvolymen. Denna sida kläddes med byggplast när försöken utfördes.

Följande småskaleförsök genomfördes:

- Utlösningstid
- Skada på dator
- Elektrisk ledningsförmåga med och utan släckning
- Påverkan på överslagsspänning
- Tryckuppbyggnad
- Siktbarhet
- Ljudnivå
- Partikelstorlek och masskoncentration
- Kemisk komposition
- Gaskoncentration

Försöksuppställningar redovisas i följande avsnitt.

4.1.1 Utlösningstid

Utlösningstiden för modellen mättes vid Lunds Tekniska Högskola genom att koppla en aerosolpatron till en våg. Vågen kopplades till IMPlog och registrerade viktförlusten över tid när patronen utlöstes.

4.1.2 Skada på dator

För att utreda huruvida en normalutrustad persondator klarar av att utsättas för en omgivning med utlöst aerosol, placerades en PC med sidopanelerna bortmonterade i ovan nämnda låda. Lådan förslöts och aerosolpatronen utlöstes. Därefter fick datorn stå i denna miljö till dess att all aerosol hade sedimenterat på golvet. Till försöket användes en släckmedelskoncentration av 80 g/m^3 .



Figure 4.1 The computer exposed to PGA prior to the exposure.

4.1.3 Elektrisk ledningsförmåga

Aerosolens ledningsförmåga över svagströmskretsar kontrollerades med hjälp av att låta aerosolen sedimentera på kretskort. Två typer av försök utfördes; med och utan släckning, detta för att se om restprodukterna hade annorlunda egenskaper än den opåverkade aerosolen. Inför försöken konstruerades två identiska set bestående av tre olika typer av kretskort. Korten bestod av vanliga krets-komponenter som t.ex. dioder, kondensatorer, transistorer, resistorer mm. Anledningen till detta var att undersöka om kretsarna påverkades olika beroende på om släckning skett eller ej.

4.1.3.1 Utan släckning

Kretskorten monterades i botten av lådan och strömsattes (olika typer av kort, 3 och 9V). Korten kopplades till IMPlog för att kunna mäta förändringar i spänningen. Efter att lådan förslutits loggades referensvärden. När aerosolen utlösts i lådan loggades värden en gång i timmen under en, dryg, veckas tid för att se om kretsarna påverkades. Ett försök med 40g/m^3 aerosolkoncentration utfördes.

4.1.3.2 Med släckning

Kretskorten monterades i botten av lådan och strömsattes (olika typer av kort, 3 och 9V). Korten kopplades till IMPlog för att kunna mäta förändringar i spänningen. 3 cl heptan placerades i en behållare 20 cm från lådans botten. Efter att lådan förslutits loggades referensvärden. Därefter antändes heptanet och fick brinna 10 sekunder innan aerosolen utlöstes. När aerosolen utlösts loggades värden en gång i timmen under en dryg veckas tid för att se om kretsarna påverkades. För att kontrollera när flamman släcktes monterades termoelement, kopplade till IMPlog, 10cm över flamman.

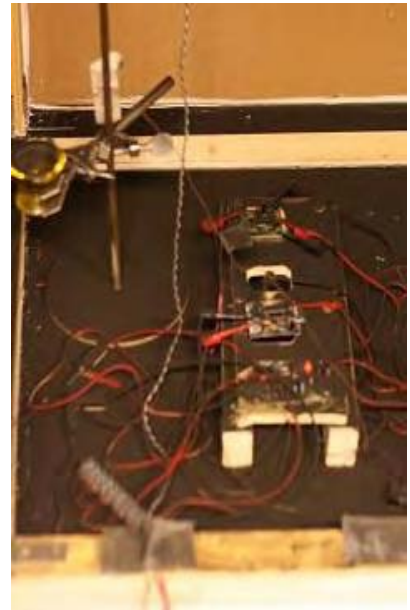


Figure 4.2 Electronics after exposure.

4.2 Påverkan på överslagsspänning -

Huruvida aerosolen påverkade ledningsförmågan mellan två strömsatta punkter undersöktes genom att med hjälp av kraftiga kondensatorer och ett varierbart gnistgap.

Varje försök utfördes i två delar, ett referensförsök utan utlöst aerosol och ett med utlöst aerosol i lådan. Ett gnistgap (se Figur 5.1) bestående av två variabla spetsar sänktes ner ca 3 cm i lådan och tre försöksserier med avstånden 1, 2 och 2,5 mm genomfördes. Samtliga försök med aerosol utfördes med en aerosolhalt av 80g/m^3 . En spänning på 6kV togs från en högspänningsgenerator, denna spänning leddes genom en $0,5\ \mu\text{F}$ kondensator för att få en lämplig tid mellan överslagen.



Figure 4.3. Spark gap.

Data loggades med hjälp av IMPlog. För att få rätt styrka på spänningen konstruerades en spänningsdelare som kopplades över gnistgapet. 24 timmar efter utfört försök kontrollerades hur stor påverkan den aerosol som fastnat på elektroderna hade på överlagsspänningen.

Högspänningsgenerator, kondensator, spänningsdelare, IMPlog och gnistgap koppades samman enligt Bilaga B.

4.2.1 Tryckkuppbyggnad

Hur stort tryck utlösning av aerosolen ger undersöktes med en digital manometer. Denna kopplades till lådan med hjälp av en plastslang kopplad till ett munstycke i lådans topp. Manometern kopplades till IMPlog och data samlades under utlösningstiden. 40g/m^3 aerosol användes.

4.2.2 Siktbarhet

Hur snabbt aerosolen sedimenterar och därmed förbättrar sikten undersöktes med hjälp av laser. Med lådan ställd på högkant borrades hål genom sidorna för att kunna sända laser genom den. 4 strålar sändes genom lådan på olika nivåer 20, 60, 100 och 140cm från botten (Figur 5.2). På motsatt sida från lasrarna monterades ljusmätare som kopplades till IMPlog. Lådan förseglades innan försöken utfördes. Innan aerosolen utlöstes gjordes en referensmätning av ljusintensiteten. Därefter utlöstes aerosolen och mätningar av ljusintensiteten utfördes varje halvtimme under 10 timmar. En aerosolkoncentration av 40g/m^3 användes under försöket. En förslutningsanordning konstruerades så att hålen skulle kunna tätas mellan mätningarna.

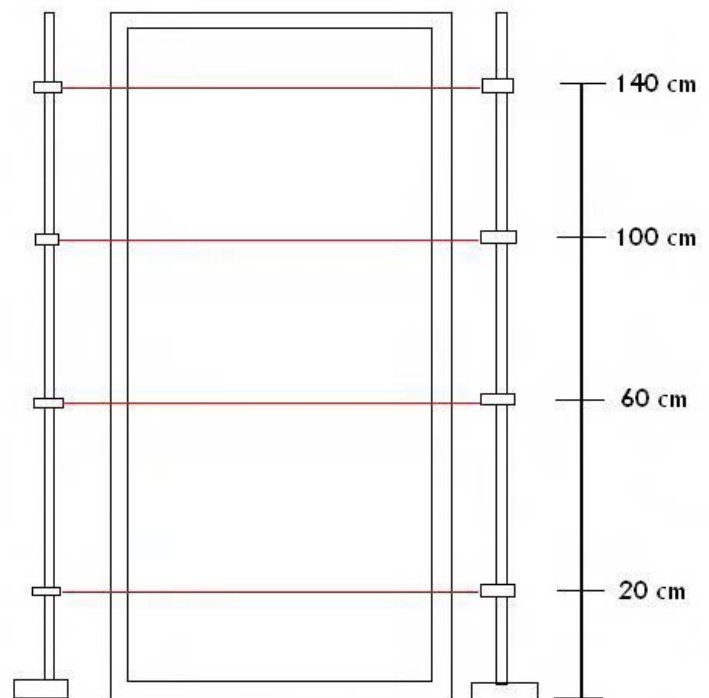


Figure 4.4. Setup for the visibility experiments.

4.2.3 Ljudnivå

Den ljudstyrka aerosolpatronerna alstrar vid utlösning undersöktes med en decibelmätare. För att undersöka vilken ljudnivå knallen från en aerosolpatron som aktiveras ger kopplades en analog decibelmätare till PICOlog. Mätaren placerades 1 meter från patronen och data loggades varje millisekund. En PGA-patron av fabrikat A 20 g användes.

4.2.4 Partikelstorlek och masskoncentration

Försöken genomfördes i samma låda som i småskaleförsöken. Sampling skedde genom att pumpa ut luft/aerosol-blandningen med hjälp av en vacuumpump. Varje produkt testades i två serier, en utan flamma och en med en flamma från ett litet heptanbål. I serierna med flamma så tilläts bålet brinna i cirka 10 sekunder innan aerosolen utlöstes. Samplingen startades cirka 30 sekunder efter det att aerosolen utlöstes.

Exp no	Products	Fire
1	A	No
2	A	Yes
3	B	No
4	B	Yes

Table 4.1. Conducted experiments.

Tre olika typer av partikelmätningar genomfördes:

- APS (Aerodynamic Particle Sizer). Mäter kontinuerligt (real-time) antalet partiklar av olika storlekar.
- Insamling på filter efter partikelföravskiljare som bestod av en impaktor. Impaktor med avskiljningsdiameter (cut-off) på 5 μ m och 1 μ m användes
- Kaskadimpaktering. Ett instrument där partiklar samlas upp på filter i tolv olika steg beroende på deras aerodynamisk diameter i spannet 0,04-12 μ m. Endast experiment 1&4.

4.2.5 Kemisk komposition

Partiklarna från försöken som beskrevs i 5.2.4 som samlades upp i filter och analyserades genom PIXE-analys (Particle Induced X-ray Emission) vilket ger massfördelningen för alla ingående grundämnen som är lika tunga som aluminium eller tyngre samt utgör minst 0,2% av den totala massan i provet.

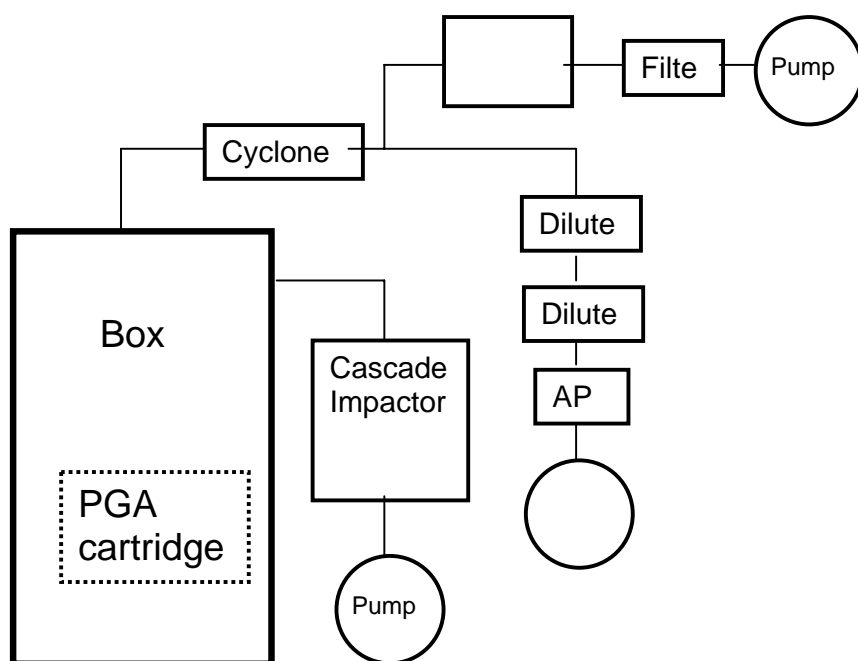


Figure 4.5. Schematic view of the particle size and mass concentration set-up measuring equipment.

4.2.6 Gaskoncentration

Försök genomfördes för att mäta CO, CO₂ och ammoniakhalten i ren, utlöst, PGA. Mätningarna av CO och CO₂ genomfördes genom att utlösa aerosolen i lådan varefter en liten del av luft/aerosol blandningen pumpades ut för mätning i en gasanalysator där koncentrationerna mättes i realtid. Ammoniakhalten mättes genom att pumpa ut luft/aerosolblandningen och ”tvätta” denna i utspädd saltsyra som sedan skickades till Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut för att kunna beräkna ammoniakkoncentrationen. Försöken genomfördes med dimensionerande koncentrationerna 40g/m³ för produkt A och 40g/m³ för produkt B.

För ammoniak genomfördes även två samlingar vid storskaleförsöken för produkt B enligt samma princip som ovan.

Tid	Händelse
0	Patronen utlöses elektriskt. Fläkten är igång vid starten.
4-5	Gasprovtagning för NH ₃ analys (gasprovet tvättades i utspädd svavelsyra varefter det sändes till SP för analys av NH ₃ enligt ”4500-NH ₃ F Phentane Method”)
6-8	On-line mätning av CO, CO ₂ och O ₂ .
10	Försöket avslutades

Table 4.2. Times for events during the gas experiments.

4.3 Storskaleförsök

Släckförsöken utfördes på Räddningstjänstskolan i Revinge i en modifierad lastcontainer. Containern hade en volym av 26,3 m³ och var isolerad med mineralull. För att kunna dra in termoelement och annat kablage fanns ett 30 cm² hål i sidan, detta tillsammans med porten gjorde att containern inte var helt tät, denna otäthet kan dock anses som försumbar då tryckmätningar ej genomfördes i fullskaleförsöken. I detta utrymme ställdes två skåp, ett med naturlig och ett med mekanisk ventilering, in. I dessa skåp placerades heptanbål med en effekt av 1,6 kW/styck ut, se Bilaga C för placering av brännare.

Totalt genomfördes fyra försök med två olika fabrikat som installerades enligt distributörens instruktioner. När alla brännare tänts så stängdes containern och efter en kort förbrinntid utlöstes släckmedlet manuellt. Försöken pågick tills alla brännare slocknat eller att man bedömde att de inte skulle släckas (15-18 minuter). Även i de försök där samtliga brännare släcktes relativt tidigt så pågick försöket i minst 12 minuter för att kunna studera temperaturförändringar i rummet

Försök	Produkt	Design concentration g/m ³ Gross amount	Design concentration g/m ³ Net amount
1	A	100	70
2	A	100	70
3	B	66	50
4	B	66	50

Table 4.3. List of experiments.

4.3.1 Släckförsök

I varje skåp placerades en brännare i botten av skåpet och en i mitten. Ute i rummet placerades ytterligare fem heptanbål, se Bilaga C för placering. Samtliga brännare förseddes med termoelement för att kunna övervaka om och när bränderna släcktes under försöken. Termoelementen kopplades till IMPlog som registrerade när brännarna slocknade.

4.3.2 Temperaturmätningar

I mitten av rummet installerades 5 termoelement i en vertikal linje för att övervaka temperaturförändringarna i rummet under försöket. För placering av skåp, brännare, termoelement och aerosolgeneratorer se bilaga C.

5 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från försöken i LTH och Revinge

5.1 Småskaleförsök

Försöken utförda i lådan på LTH redovisas i följande avsnitt.

5.1.1 Utlösningstider

Försöken med utlösningstider utförda i LTH visar att en PGA typ produkt A 20 g har en utlösningstid på 2-3 sekunder (se bilaga D). Detta stämmer överens med den tid som anges i produktens informationsmaterial [11].

5.1.2 Skada på dator

Efter att ha varit placerad i lådan i en vecka plockades datorn ut ur lådan och en funktionstest utfördes. Datorn stängdes av, startades och program kördes utan problem. Datorn har sedan försöken utfördes kontrollerats vid ett antal tillfällen och ingenting tyder på att den har blivit skadad. Det kan nämnas att försöken utfördes i augusti 2007 och, i skrivande stund (april 2008), fungerar datorn fortfarande som den ska.

5.1.3 Elektrisk ledningsförmåga

Försöken utfördes både med och utan att PGA fick släcka en flamma. Resultaten redovisas nedan.

5.1.3.1 Utan släckning

Under de tio dagar försöken pågick kunde ingen nämnvärd förändring av strömstyrkan påvisas på något av korten (Se bilaga D). Den sedimenterade PGA'n hade bildat ett tunt lager över kretskorten, tjockleken på detta lager mättes aldrig då antagandet att ett tunt lager PGA har samma effekt som ett tjockare lager då det endast är i kontaktytan mellan kort och PGA som eventuella krypströmmar kommer att uppstå. På kort 3 syntes en svag sänkning av spänningen men denna var 0,01 V. Förändringarna på sin helhet är så små att de snarare beror på naturliga fluktuationer i strömförsörjningen eller resistansförändringar p.g.a. temperaturskiftningar än aerosolens inverkan.

5.1.3.2 Med släckning

Försöken med släckning gav ungefär samma resultat som utan släckning och inga nämnvärda förändringar registrerades (se bilaga D). Noterbart är att med en aerosolkoncentration av 40g/m^3 gick flaman ej att släcka. Detta innebar att en stor del av släckmedlet reagerade med flaman och att stora mängder av restprodukter bildades.

5.1.4 Påverkan på överslagsspänning

Resultaten från de utförda försöken visar att aerosolen har en viss påverkan på överslagsspänningen. Spänningen som krävs för överslag vid ett 1 mm gnistgap är 4500 V i luft och 3000 V med utlöst aerosol (se bilaga E). Liknande skillnader återfinns vid 2 mm och 2,5 mm gnistgap. Den ansamlade mängden aerosol på stiftet bidrog till viss del till att en lägre överslagsspänning men skillnaden var liten i förhållande till sänkningen som uppkom av den luftburna aerosolen.

5.1.5 Tryckuppbyggnad

I lådan uppmättes ett maximalt tryck av ~350Pa (se bilaga D). Denna tryckuppbyggnad skedde under tiden som aerosolen utlöses, därefter sjönk trycket snabbt till normala nivåer.

5.1.6 Siktbarhet

Resultaten från sedimentationsförsöken är som förväntade, aerosolen har en väldigt långsam fallhastighet. Sju timmar in i försöket var sikten som bäst 90% av den ursprungliga (Figur 6.1). Efter att försöket avslutades upptäcktes att lasern på 20 cm nivån hade flyttats under försökets gång, vilket innebär att resultaten från den mätserien inte är korrekta. Den aerodynamiska diametern som nämns i föregående avsnitt kan kopplas till sikten, med hjälp Tabell G.1 i Bilaga G, vilket, t.ex., ger att en koncentration av 40 g/m^3 ger en sikt på 4 cm. Detta värde stämmer väl överens med observationerna som gjordes.

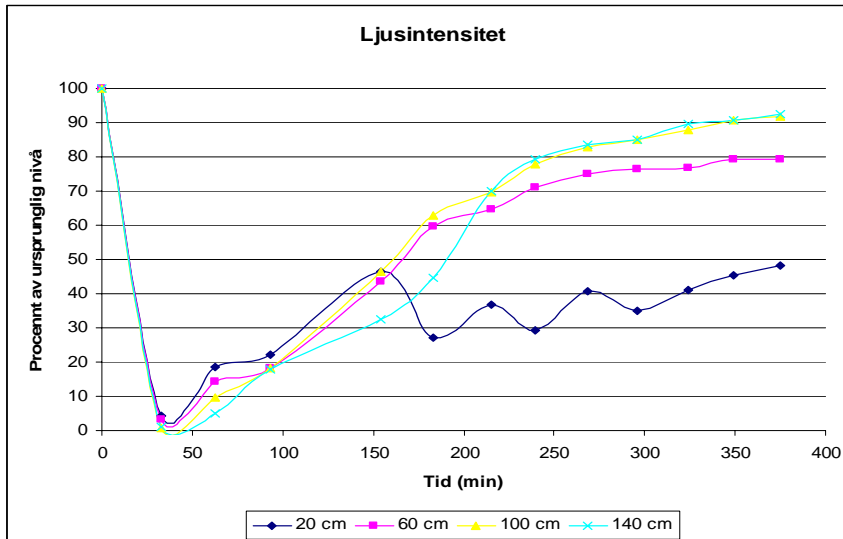


Diagramme 5.1. Change of visibility with time. 100% equals perfect visibility.

5.1.7 Ljudnivå

Vid försöken uppmättes en ljudnivå av 86-95dB på ett avstånd av 1 meter från ljudkällan (se bilaga D).

5.1.8 Partikelstorlek och masskoncentration

Resultaten av de mätningar utförda av avdelningen för ergonomi och aerosolteknologi vid LTH visar att majoriteten av massan initialt har en aerodynamisk diameter av 0,8 μm men efter hand ökar storleken något till 1,5 μm , (se bilaga H). Konsekvenserna av detta är att släckmedlet är väldigt effektivt, men samtidigt är den aerodynamiska storleken så att partiklarna har en tendens att fastna på väggarna på grund av statisk elektricitet [16]. Detta blir väldigt tydligt när den uppmätta koncentrationen i lådan beaktas, mätningar visar att en designkoncentration av $40\text{g}/\text{m}^3$ endast ger en bråkdel av detta och den faktiska koncentrationen mättes till 6.7-11.1 % av designkoncentrationen. Se Figur D.20.

5.1.9 Kemisk komposition

PIXE-analysen visade att utlösta aerosolpartiklar bestod av de grundämnen som anges i Diagram X. Observera att endast ämnen som utgjorde mer än 0,2% av den totala vikten redovisats.

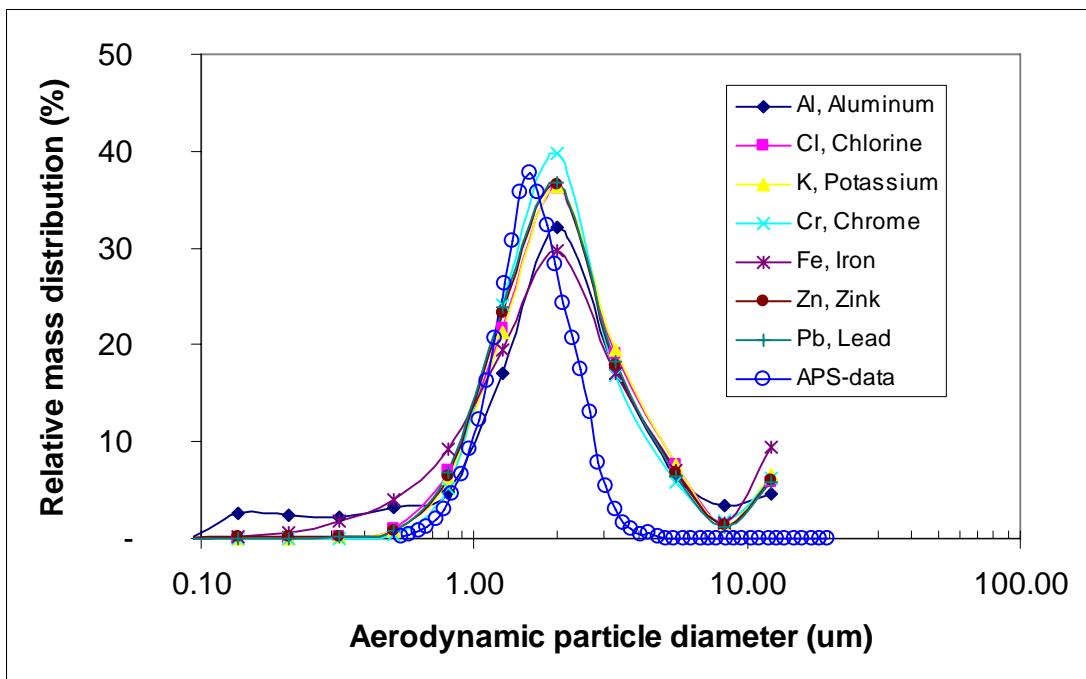


Diagramme 5.2. Size distribution of elements. Note the scale is logarithmic.

5.1.10 Gaskoncentration av koldioxid och kolmonoxid

Mätningarna gav följande koncentrationer av koldioxid och kolmonoxid.

Kolmonoxid	Koncentration [PPM]	IDLH (PPM)
Produkt A	1030	1200
Produkt B	1760	1200

Koldioxid		
Produkt A	5000	40 000
Produkt B	6800	40 000

Table 5.1. Measured concentrations of Carbondioxide and Carbonmonoxide with their corresponding IDLH-values (from NIOSH⁴).

5.1.11 Gaskoncentration av ammoniak

Mätningarna gav följande koncentrationer av ammoniak.

Storskaleförsök	Koncentration (PPM)	IDLH (PPM)
Produkt B prov 1	533	300
Produkt B prov 2	574	300
Småskaleförsök		
Produkt A	648	300
Produkt B	564	300

Table 5.2. Measured concentrations of Ammonia with corresponding IDLH-value (from NIOSH⁵).

5.2 Storskaleförsök

Resultaten från storskaleförsöken i Revinge redovisas nedan, alla försök utfördes i dubbel upplaga med både Produkt A och B.

5.2.1 Släckförsök

Släckförsöken utfall var som väntat mycket bra, i de fall något bål inte släcktes korrigerades konfigurationen av PGA behållare och det föll väl ut som försök 2 med båda produkterna visar. Resultaten från försök 1 med produkt A och B redovisas nedan, resultaten från försök 2 redovisas i bilaga E.

5.2.1.1 Utvändiga bål

Båda försöken visar att bålen släcks omgående efter det att aerosolen aktiverats, med undantag av det bål som stod placerat på golvet mitt i rummet (bål 9 se figur C.3 i Bilaga C). I försök 1 med produkt A (Diagram 5.3) släcks detta bål ca 18 minuter in i försöket. I försök 1 med produkt B (Diagram 5.4) släcks bålet som är placerat lågt i ett hörn aldrig (bål 5 se figur C.3. i bilaga C).

⁴ NIOSH: The national institute for occupational safety and health.

⁵ NIOSH: The national institute for occupational safety and health.

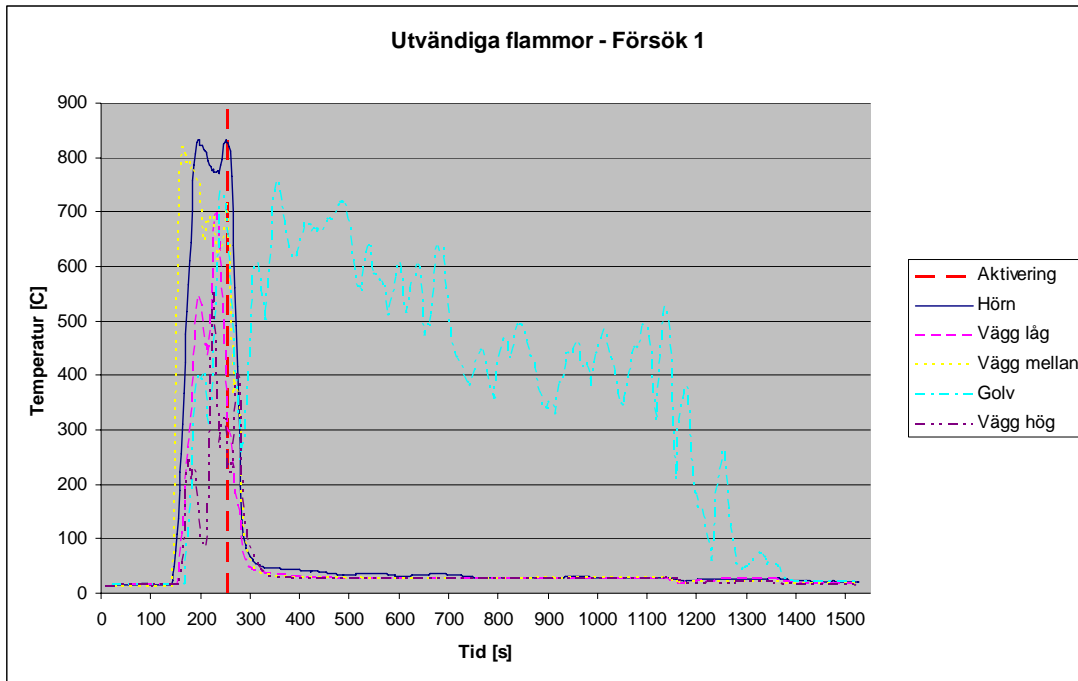


Diagramme 5.4. Flame extinguishing times, product A.

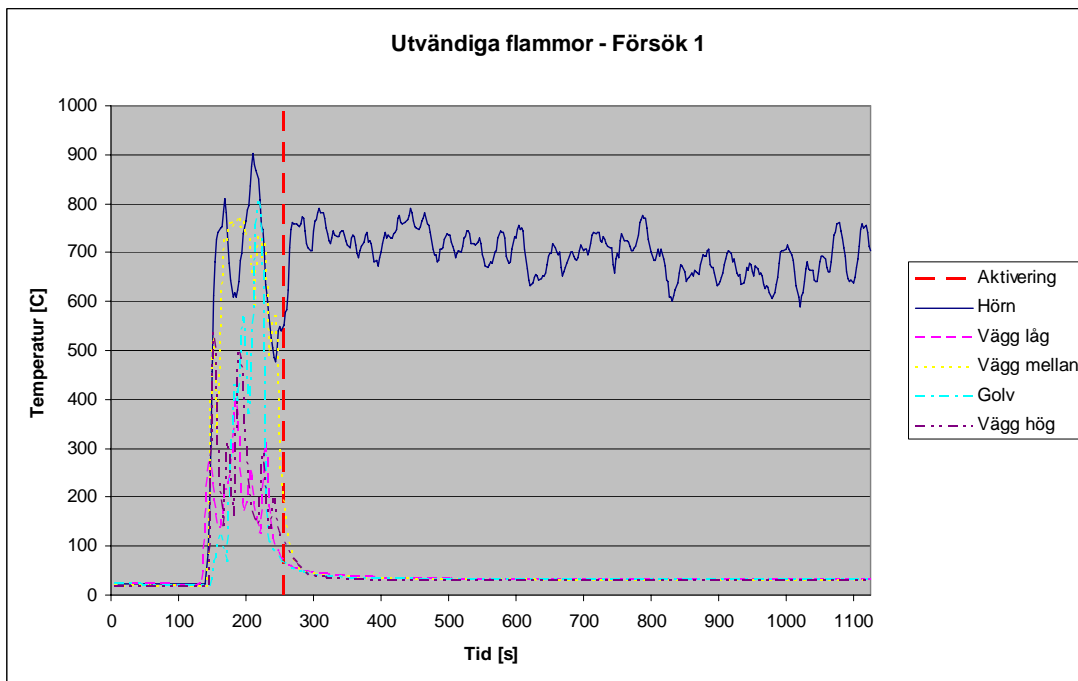


Diagramme 5.5. Flame extinguishing times, product B.

5.2.1.2 Invändiga bål

Resultaten visar att 3 av 4 bränder släcktes inom 2 minuter från dess att släckmedlet aktiverats. I försök 1 med produkt A (Figur 5.6.) släcktes bål 1:B först när bränslet tog slut. I försök 1 med produkt B (Figur 5.7) var samtliga bål i skåpen släckta inom 100 sekunder.

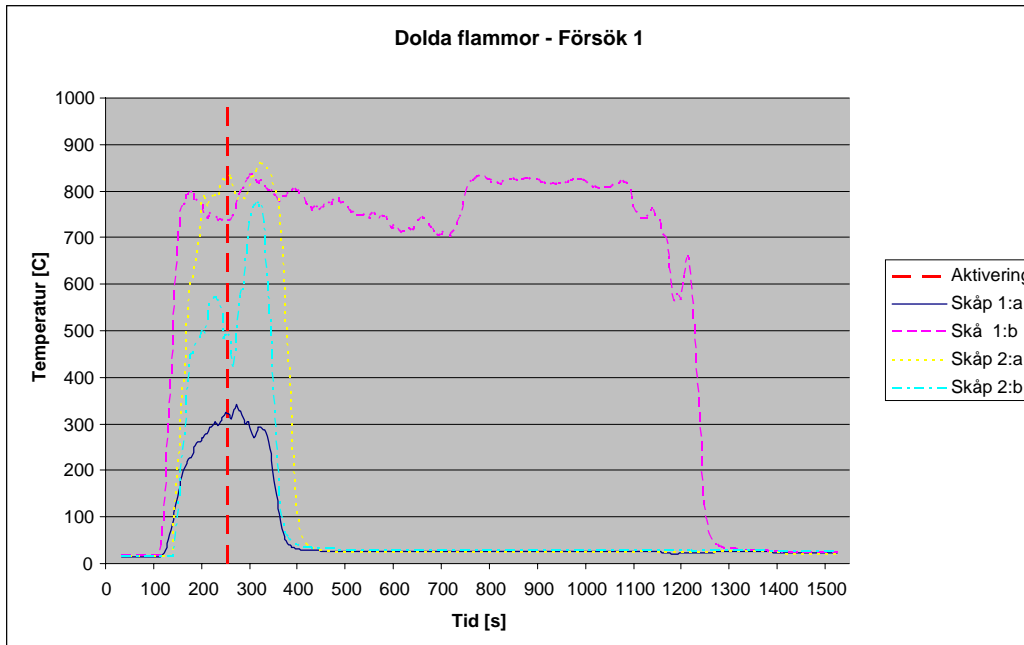


Diagramme 5.6 Flame extinguishing times, product A.

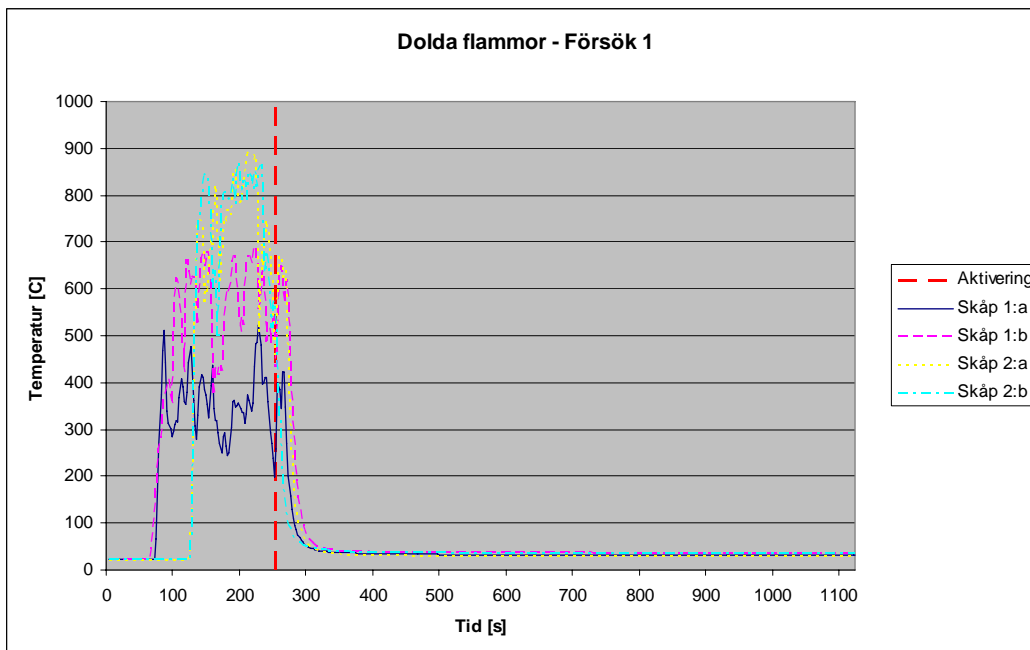


Diagramme 5.7. Flame extinguishing times, product B.

5.2.2 Temperaturmätningar

Resultaten visar att temperaturen i inneslutningen ökar något efter att släckmedlet utlösts. Men i förhållande till temperaturökningen från bålén så är denna ökning marginell. Diagrammen visar att temperaturen efter släckning av alla utom ett bålén lägger sig på en konstant nivå. I försök 1 med produkt A (Figur 5.8) släcktes det sista bålén 1100 sekunder in i försöket. I försök 1 med produkt B (Figur 5.9) släcktes aldrig bålén som stod placerat i ett av hörnen. För placering av termoelement se figur C.5 i bilaga C.

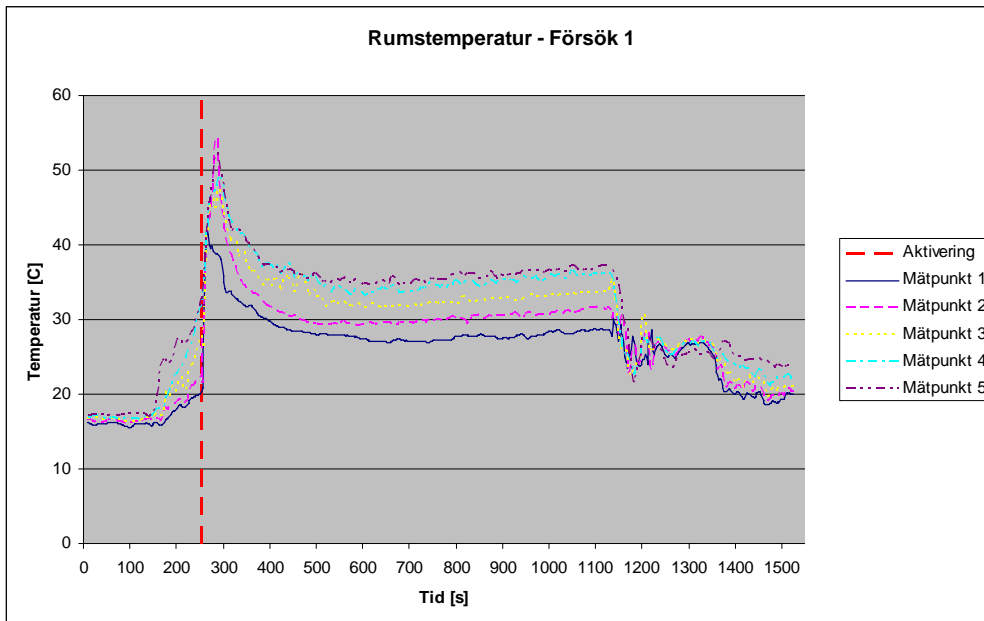


Diagramme 5.8. Change in room temperature, product A.

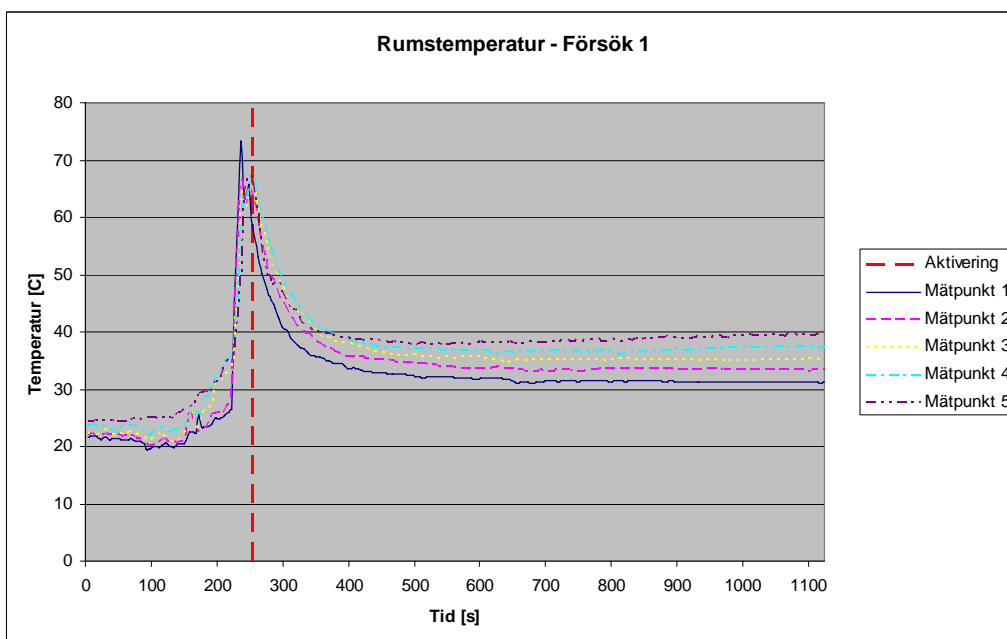


Diagramme 5.9. Change in room temperature, product B.

6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultaten med gentemot teori och lagstiftning.

6.1 Skada på dator

Påverkan på en persondator utfördes egentligen som ett inledande försök för att kontrollera hur aerosolen skulle utlösas och för att se så att den inte direkt påverkade elektriska komponenter negativt. Då ingenting hände med datorn under försöket beslutades att den skulle kontrolleras med jämna mellanrum. 8 månader efter försöket fungerade den fortfarande. Hårddisken bör ha sugit in en hel del av aerosolen dock utan skadligt resultat. En sak som inte kontrollerats är huruvida läshuvudet på en CD/DVD-ROM kan ha påverkats av sedimenterad aerosol, detta för att datorn saknade denna komponent.

6.2 Elektrisk ledningsförmåga

Komponenterna som utsattes för försöken blev kraftigt nedsmutsade av sedimenterad aerosol, detta utan att visa någon betydande funktionsförändring. Under försöken med släckning noterades en mycket liten sänkning av spänningen på de olika korten, om denna beror på aerosolen eller andra faktorer som temperaturskillnader i brandlabbet är svårt att avgöra. Sänkningarna var av storleksordningen 0,01 V under en vecka och kan ses som obetydlig i sammanhanget då en sanering av det brandskadade utrymmet säkerligen hade inletts inom en vecka i ett verkligt fall.

6.3 Påverkan på överslagsspänning

Den största sänkningen av överslagsspänningen som uppmättes var ~43%. Detta är förvisso ingen försumbar sänkning men det är rimligt att anta att säkerhetsavstånden till högspänningsanläggningar är betydligt större i procent räknat. T.ex. anger IEC 60076 att minsta avstånd mellan spänningsförande delar skall vara 70mm för spänningar upp till 7,2 kV – vilket är jämförbart med de spänningar som berörts i denna rapport [13]. När det gäller personsäkerhet så anger Elsäk-FS 1999:5 ett säkerhetsavstånd, för människor, om 6 meter i vertikal ledd vid spänningar över 40kV [14]. Detta säkerhetsavstånd är flera potenser högre än det faktiskt möjliga överslagsavståndet och en 43%-ig sänkning är därmed inte av någon större betydelse.

6.4 Tryckuppbyggnad

Mätningarna visade att trycket i lådan ökar till ~350 Pa övertryck. Byggnadskonstruktionsmässigt är detta en relativt liten ökning och fönster och väggar skall klara av detta utan problem. NFPA 2010:7.3.5 anger enbart att tryckuppbyggnaden som en PGA genererar skall beaktas vid installation i ett slutet utrymme. Detta blir framför allt aktuellt i fall där man behöver högre dimensionerande släckkoncentrationer i mycket täta utrymmen. I dessa fall kan det bli aktuellt att man måste fundera på tryckavlastande åtgärder.

6.5 Utlösningstider

Enligt NFPA 2010:7.7.1.2 skall 95% av släckmedelskoncentrationen ha infunnit sig inom 10 sekunder och CEN TR 15276-1:5.4 anger samma fast med tillägget att vid tester är denna tiden 90 sekunder.

I försöken med båda produkterna konstateras det att aerosolpatronen töms på ca 2-3 sekunder, vilket är väl inom gränserna för godkännande enligt NFPAs regelverk. Det bör noteras att detta enbart mättes för 20 g och 30 g storlekarna av produkt A respektive B. Under storskaleförsöken i Revinge användes större PGA behållare av båda fabrikaten dock utfördes inga mätningar på utlösningstiden. Efter att ha lyssnat på plats konstaterades det att även de större behållare som användes vid försöken tömdes inom 10 sekunder. Detta är inte validerat för alla typer och storlekar av PGA och således måste det kontrolleras för varje typ.

6.6 Siktbarhet

Jämfört med Tabell G.1 i bilaga G stämmer sikten bra överens med resultaten från försöken. En fråga väcks dock när det beaktas att endast 4-16,7 % (se Tabell 5.3) av den tänkta koncentrationen faktiskt återfinns. Har tabellen konstruerats med detta i åtanke? Eller är det så att det är den gasformiga aerosolen som försämrar sikten? Det viktiga i sammanhanget är dock att sikten blir i stort sett obefintlig och förblir så under flera timmar. Flera av avsnitten i NFPA 2010:5.2 och annex C anger att detta skall beaktas vid installation.

6.7 Partikelstorlek och masskoncentration

Mätningarna visade att partikelstorleken var något mindre än den producenten angett, detta innebär att släckmedlet är något mer effektivt och att partiklarna har en förmåga att fastna på väggar. Vidare visade mätningarna av koncentrationen är betydligt lägre än den dimensionerande koncentrationen återfinns, detta förklaras delvis genom att stora delar av aerosolen kommer ut i gasfas (vilket ej mätts) samt att en stor andel av partiklarna antas fastna på väggar.

Exp. No	Nominal conc. (g/m ³)		Measured mass conc. (g/m ³)	PM1/PM5	Estimated initial mass conc.* (g/m ³)	Calculated Efficiency**
1	40	< 1 µm	0.29	13%		
		< 5 µm	2.17		2.9	7.2%
2	40	< 1 µm	0.45	9%		
		< 5 µm	5.01		4.3	16.7%
3	60	< 1 µm	0.15	8%		
		< 5 µm	1.81		4.0	4.0%
4	60	< 1 µm	0.22	7%		
		< 5 µm	3.20		7.1	7.1%

Table 5.3. The last column to the right shows the Calculated efficiency as the measured concentration divided by the factory concentration.

Den viktiga faktorn när det rör hälsorisker är att partiklar av denna storlek påverkar hela andningsapparaten då de är små nog att nå ner i alveolerna. Studier har genomförts på råttor med ett liknande släckmedel. Resultatet från den studien visade bland annat att luftvägar irriterades och att 20 % av djuren visade tecken på lunginflammation efter 7 dagar. Det är värt att nämna att djuren utsattes för höga koncentrationer i en sluten miljö och under relativt lång tid.

6.8 Kemisk komposition

Den kemiska sammansättningen av partiklarna mättes med Pixe-metoden, Bilaga H

	A	A	B	Ratio	Ratio
	Pixe analyze	Manufacture	Pixe analyze	A/B	A/Manu
	%	%	%		
Al	0.034	0.002	0.008	4.19	15.5
As	0.006	0.00004	0.014	0.40	159
Ba		0.071			
Br		0.096			
Ca		1.178	0.029		
Cd		0.0004			
Cl	12.045	1.489	19.171	0.63	8.09
Cr		0.005			
Cu		0.046	0.002		
Fe	0.645	0.054	0.882	0.73	12.0
Ga					
Ge					
K	81.308	95.810	71.687	1.13	0.85
Mn	0.034	0.0004	0.061	0.56	94.7
Mo					
Ni		0.328			
P					
Pb	5.704		7.961	0.72	
Pd					
Rb		0.071			
S					
Se		0.0004			
Si	0.004		0.022	0.20	
Sn					
Sr		0.146			
Te		0.007			
Ti	0.005	0.011	0.0011	4.78	0.50
Tl					
V		0.001	0.0002		
W		0.0004			
Y					
Zn	0.215	0.011	0.162	1.32	20.1
Zr					
Sum	100	99.3	100		

Mätningarna visade att de individuella ämnenas förekomst avseende TLV-värdet inte kommer att bli den begränsande faktorn. Den totala masskoncentrationen kommer att vara den begränsande

faktorn. Då den största delen av partiklarna är mindre än 5 µm är det mer lämpligt att använda termen "respirable fraction", som består av partiklarna mindre än of particles 5 µm.

6.9 Gaskoncentration

Resultaten visade att CO₂ koncentrationerna var klart under IDLH värdena medan koncentrationen av ammoniak och CO var från i linje med till nästan dubbelt så hög som IDLH vilket anger att även en kort exponering kan vara mycket obehaglig och längre exponeringar kan vara direkt skadliga. Det bör noteras att det i småskaleförsöken användes en dimensionerande koncentration av 40 respektive 60 g/m³ vilket är klart under de rekommenderade släckkoncentrationerna för samtliga brandtyper. Det måste beaktas innan man träder in i ett rum där PGA har utlösts.

6.10 Ljudnivå

Enligt AFS 2005:16 3§ är den tillåtna ljudimpulsnivån 135dB, PGA typ A 20 g genererar som mest en nivå av 86dB när den utlöses. Denna nivå är klart under detta gränsvärde och således fullt acceptabel. Vidare står det att en daglig bullerexponeringsnivå ej skall överstiga 85dB/8H även här hamnar denna produkt under rekommenderade nivåer då utlösningstiden tillika bullertiden endast är ett par sekunder.

Mätningar för produkt B eller för övriga storlekar av PGA utfördes aldrig, men då försök med övriga storlekar och Produkt B genomfördes kunde inte någon hörbar skillnad i ljudnivå noteras och således klarar även dessa produkter av kraven i AFS 2005:16 3§.

6.11 Storscaleförsök

Resultaten från försöken blev de förväntade med undantag av att det övre dolda bålet i det skåpet med mekanisk ventilation inte släcktes när produkt A användes. I efterhand konstaterades det att fläkten i skåpet sannolikt såg till att aerosolen aldrig nådde flamman på grund av skåpets invändiga geometri i förhållande till bålet och fläktens placering. I skåpet med naturlig ventilation släcktes bålet däremot fort med båda produkterna. Slutsatsen som dras av detta är att mekanisk ventilation kan hjälpa till att dra in aerosol till dolda utrymmen, men den kan lika gärna dra bort aerosolen från det tänkta målet. Med naturlig ventilation drar flammorna till sig aerosolen och släcks.

Problemet med att släcka lågt placerade bränder kan lösas genom att tänka igenom placering av aerosolgeneratorerna i rummet. Försöken visade att med en justering av riktningen, i vilken aerosolen strömmar ut, släcktes även de lågt placerade bålet. Tanken var att skapa ett cirkulerande flöde av aerosoler i inneslutningen och detta föll mycket väl ut.

7 Sanering

Även om det inte testats eller kunnat påvisas att korrosion uppstått under de försök som genomförts i denna rapport så nämns det i litteraturen (t ex Kangedal) att kaliumbaserade släckmedel kan resultera i betydande kemisk korrosion. Släckmedlet behöver inte nödvändigtvis vara det största hotet – vid förbränning av PVC (polyvinylklorid, vanligt förekommande i kablar m.m.) så bildar förbränningsprodukterna saltsyra i kontakt med vatten och detta blir då ett större problem än släckmedlet. Men det är ändå av stor vikt att förstå saneringsproblemen i samband med användandet av PGA.

Ett saneringsföretag kontaktades för att ge sin syn på vad som bör beaktas vid sanering av PGA.

Det första som måste beaktas är personalskyddet. Då partiklarna är mycket små är det viktigt att tänka på att använda andningsskydd som kan hantera mycket små partiklar. Filtermask av tillräckligt hög kvalitet fungerar. Då partiklarna är väldigt små så fungerar vanliga dammsugare inte. Dels är partiklarna så små att de inte fångas säkert i vanliga dammsugarfilter och dessutom har små partiklar starka adhesionskrafter till de ytor de sitter på – de vill alltså inte gärna ”släppa taget”. En effektivare metod är istället att torka av ytorna manuellt med en våt trasa.

Om saneringen har dröjt så att partiklarna börjat binda till sig fukt så bildas en sörja som är svårare att få bort. Det kan i detta fall vara en god idé att man torkar utrustningen eller utrymmet genom att värma upp detta till 40-50°C varpå fukten torkar ut och partiklarna kan då torkas upp med en fuktig trasa. I de fall då det är svårt att komma åt överallt så kan man komplettera med spolning med destillerat vatten för att skölja bort eventuella partikelrester. Det är då, naturligtvis, viktigt att all utrustning är avstängd och att kondensatorer laddats ur.

Det lättaste sättet att sanera på är dock att ventiler utrymmet. Då partiklarna håller sig svävande under lång tid så kan de enkelt sugas eller blåsas ut, inom rimlig tid, då de följer luftströmmarna. Det krävs dock att man förvissat sig om att branden är släckt och att man har god förståelse om vart man ventilerar ut partiklarna. Denna metod eliminerar inte behovet av den manuella saneringen helt men kan avsevärt snabba upp processen. Om man ventilerar utrymmet och sikten börjar närma sig 10 m har koncentrationen av partiklar sjunkit en faktor i storleksordning 100 i förhållande till partikelkoncentrationen omedelbart efter utsläppet av PGA

Referenser

- [1] Peter Kangedal, Tommy Hertzberg, Magnus Arvidsson. *Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning – en litteraturstudie*, Brandforskprojekt 507-991 SP Brandteknik, 2001
- [2] G. Back, M Boosinger, D Beene, L Nash, E Weaver *An evaluation of aerosol Extinguishing systems for mashinery space applications-* U.S Coast Guard Research and Development Center- final report, december 2005
- [3] Acceptable Substitutes for Halon 1211 Streaming Agents Under the Significant New Alternatives Policy (SNAP) Program, US EPA
- [4] NFPA 2010, Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Agents (2006)
- [5] Personlig kommunikation med Mikael Billström , Sprinklerhuset samt Magnus Arvidsson SP. 2007-03-13
- [6] Personlig kommunikation med Bradford Colton, AMPAC Corp, Las Vegas. 2007-03-14
- [7] Personlig kommunikation med Pontus Nordberg, Brandingenjör på Försvarets Materielverk, FMV 2007-03-14
- [8] S. Särdaqvist, *Vatten och andra släckmedel* ISBN 91-7253-145-2 Räddningsverket Karlstad
- [9] Aerosol Fire Extinguishing Technology
- [10] USCG
- [11] Produkt A produktinformation
- [12] Produkt B produktinformation
- [13] Elsäk-FS 1999:5, ISSN 1103-405X, Elanders Gotab, Stockholm 1999
- [14] IEC 60076-SER, *Power transformers – all parts*, International Electrotechnical Commission, 2008-02-27
- [15] E. Smith et al, *The Toxicological Assessment of a Fire Suppressant and Potential Substitute for Ozone Depleting Sustances*, Naval Medical Research Institute Detachment (Toxicology), USA
- [16] Kimmel E.C, Smith E.A., Reboulet J.E., Black B.H., Sheinson R.S., and Carpenter R.L. *Physical and chemical characteristics of SFE fire suppressant atmospheres. Comparison of small with large laboratory atmospheres. Contribution to conference*, HOTWC 1995 (Halon Options Technical Working Conference

Bilaga A – Instruktion till hur man ansöker om godkännande av explosiv vara

På följande uppslag finns den instruktion som skall följas för ansökan om godkännande av explosiv vara.

Instruktion till hur man ansöker om godkännande av explosiv vara.

Inledning

Explosiva varor skall ha ett gott skydd mot oönskade explosioner och verkan därav. Explosiv vara skall vara godkänd vilket innebär myndighetens kontroll av att varan är tillverkad så att skyddet är tillräckligt. Den som önskar tillverka eller importera varan skall söka godkännande hos

Räddningsverket
Enheten för brandfarliga och explosiva varor
651 80 KARLSTAD

En ansökan om godkännande skall innehålla följande uppgifter.

Sökandens namn, adress och organisationsnummer

Tillverkarens namn och adress

Om något annat företag än sökanden tillverkat en explosiv del t.ex. själva patronen skall den explosiva delen samt tillverkarens namn och adress anges.

Den explosiva varans namn eller beteckning

Varan skall ha ett namn eller beteckning så att den inte kan förväxlas.

Beskrivning av den explosiva varan

Beskrivningen skall innehålla huvudslag, användningsområde, konstruktion och ingående explosivämnen.

Huvudslag för denna typ av produkt är vanligen "Huvudslag V Pyrotekniska varor".

Användningsområde kan vara t.ex. bergsprängning, inre bilsäkerhet, ammunition etc.

Konstruktion skall anges genom sammanställningsritning och detaljritning som visar den explosiva delens placering och utformning. Ritningarna skall vara måttsatta.

Explosivämnenas totala vikt skall anges. Om varan innehåller flera explosiva delar skall vikten explosivt ämne i varje del anges. Storlek på tändsats och ev. booster skall anges. Dessutom skall sammansättningen av explosivämnet med toleranser på ingående komponenter anges. Summan av ingående ämnens procentsatser skall bli 100 % + toleransen. Uppgifterna kan erhållas från tillverkaren av delen.

Provresultat

För att få varan klassificerad för **transport** krävs vanligen att den provats enligt prov 6 (c) (Bonfire test) i FN:s rekommendationer om transport av farligt gods. Provet måste i så fall ha utförts med samma förpackning som varan skall transporteras i. En fullständig provrapport skall bifogas ansökan, inte enbart resultaten. Information skall ges om provningen är baserat på serieförpackning eller reservdelsförpackning.

Den explosiva varan kommer att få en klassificering av SRV för **hantering** (ej transport) utan förpackning.

Klassificering från annat land

I de flesta länder krävs ett godkännande och klassificering av en oberoende organisation (myndighet eller provningsinstitut). Om man har ett godkännande och en klassificering från ett annat land och vill åberopa dessa så skall en fullständig provrapport med resultat och godkännandebeslut bifogas ansökan. Exempel på oberoende organisationer är:

BAM (Tyskland)
INERIS (Frankrike)
DOT (USA)
TNO (Holland)

Restriktioner

Om begränsningar finns t.ex. beträffande temperatur, fuktighet och tid vid lagring och hantering av den explosiva varan så skall detta framgå av ansökan.

Annan liknande explosiv vara

Om det finns någon liknande explosiv vara som sökanden fått godkänd tidigare och vill åberopa detta godkännande så skall detta anges i ansökan. En jämförelse mellan den ansökta explosiva varan och den liknande skall finnas med. Det är viktigt att jämförelsen tydligt visar skillnader och likheter för allt som har skyddsteknisk betydelse t.ex. mängd explosivt ämne och utformning.

Förpackning

Den förpackning som den explosiva varan provats i skall anges i ansökan. Uppgiften finns i provrapporten. Information skall ges om provningen är baserad på serieförpackning eller reservdelsförpackning.

Förslag till klassning

Den eller de klassificeringar som sökanden anser att den explosiva varan skall få anges i ansökan. Klassificeringen skall baseras på utförda provningar. Observera att den explosiva varan kan få olika klassificeringar beroende på förpackning.

Underskrift

Firmatecknare skall skriva under ansökan.

Bilaga B – Högspänningstest

Kopplingschema

Figur B.1 visar hur utrustningen till högspänningsförsöken kopplades samman.

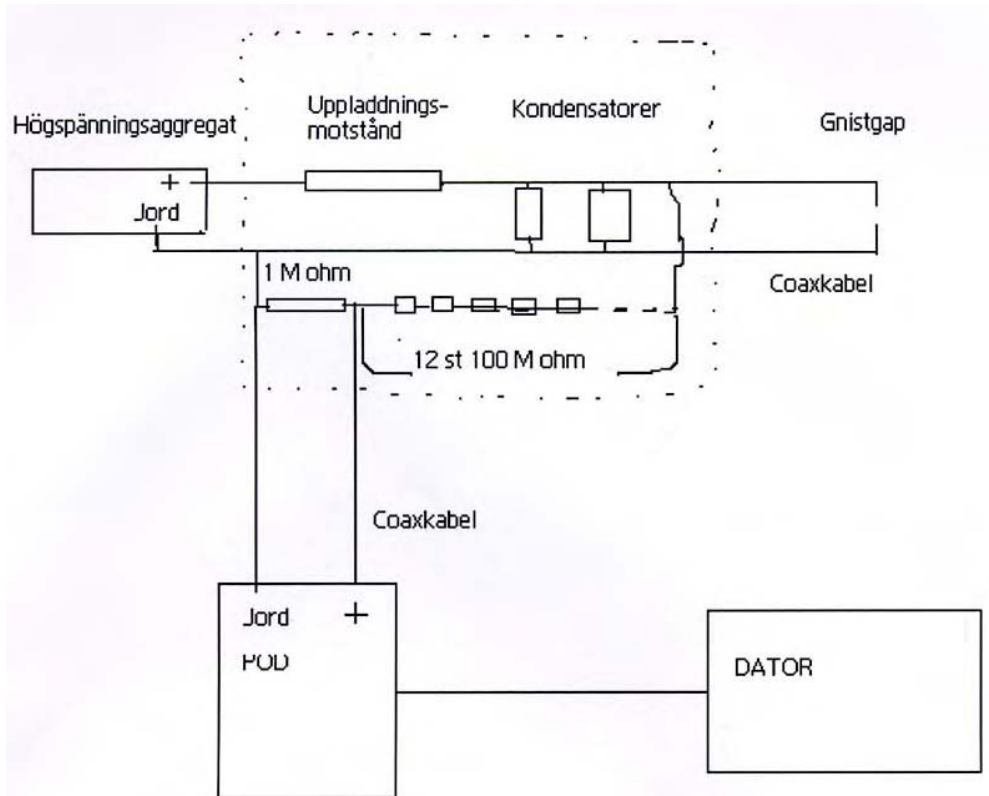


Figure B.1. Wiring diagramme for the high voltage experiments.

Bilaga C – Försöksuppställning vid släckförsök

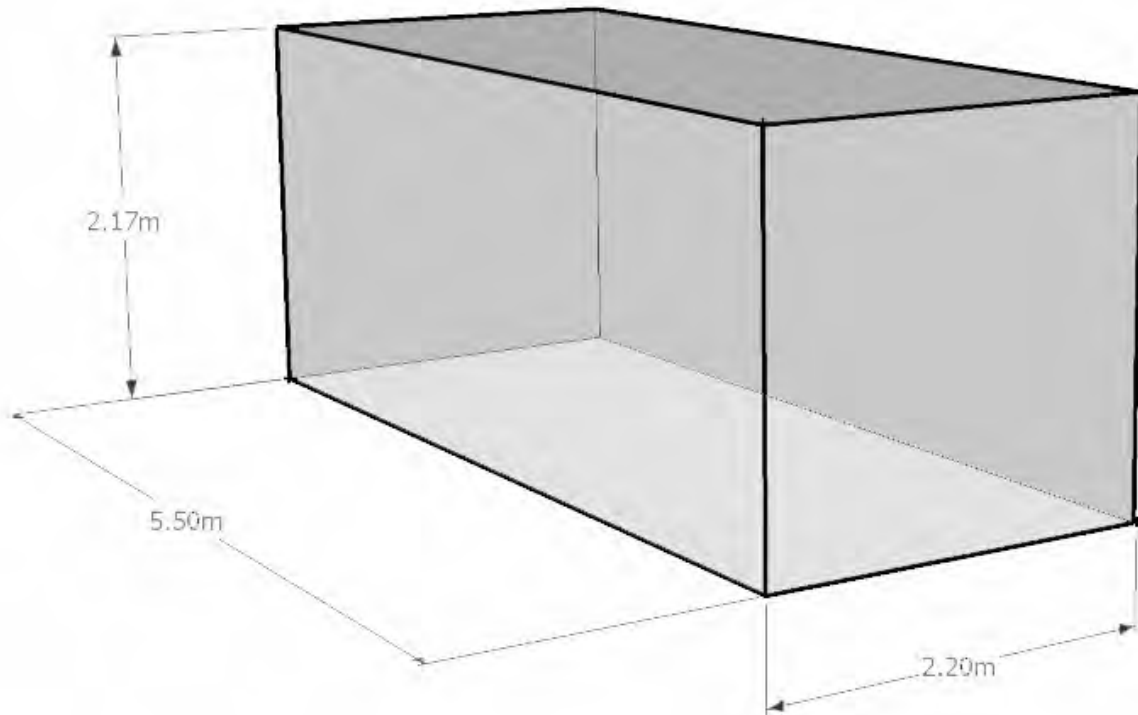
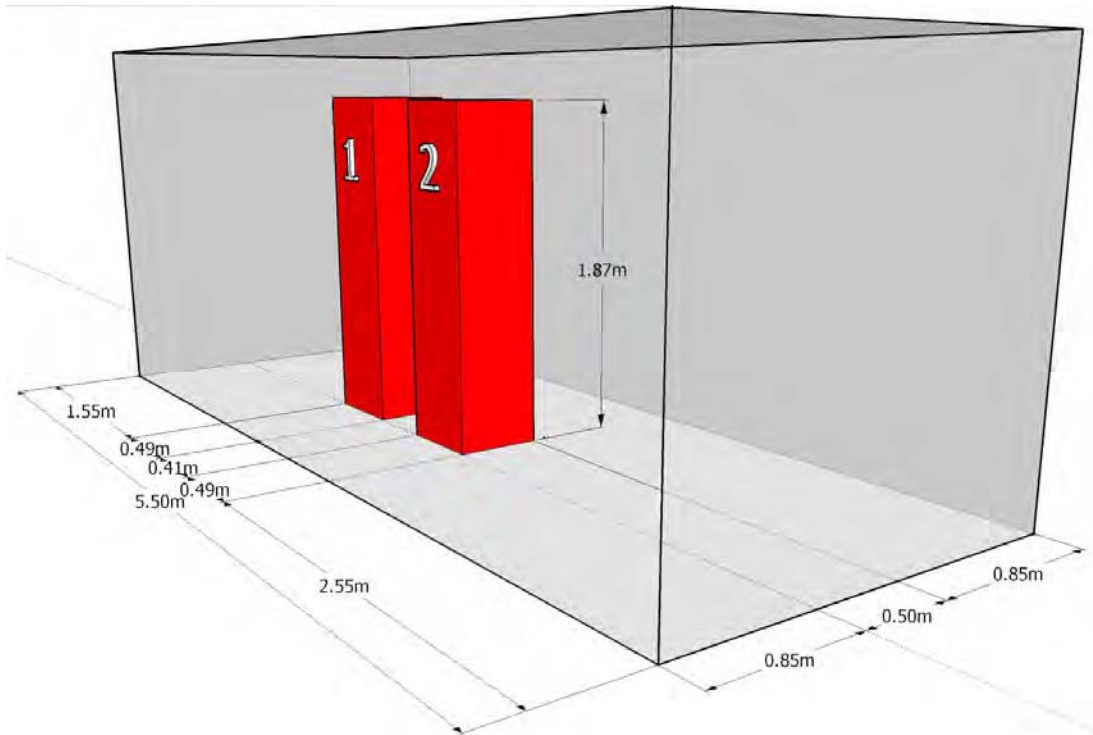


Figure C.1. Container measurements.



Figur C.2. Positions of the cabinets in the container. Cabinet 1 is equipped with mechanical ventilation, cabinet 2 is naturally ventilated.

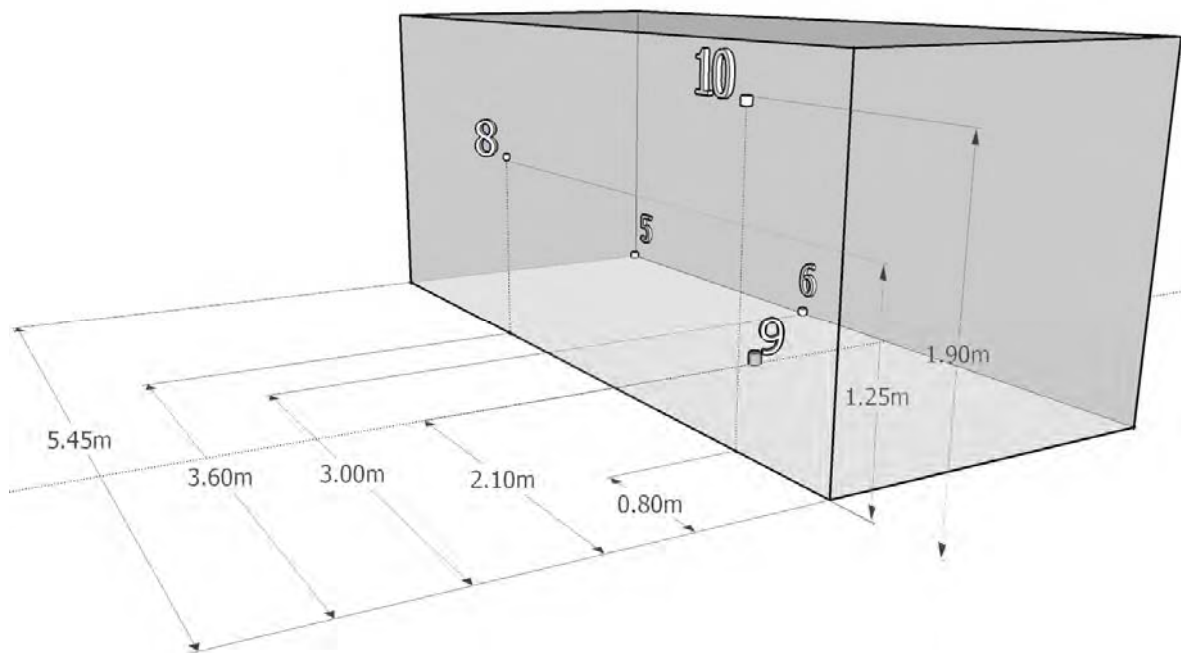


Figure C.3. Positions of the flames in the container.

The flames have the following names in the report.

Nummer	Namn
Brännare 1	Skåp 1:A
Brännare 2	Skåp 1:B
Brännare 3	Skåp 2:A
Brännare 4	Skåp 2:B
Brännare 5	Hörn
Brännare 6	Vägg låg
Brännare 8	Vägg mellan
Brännare 9	Golv
Brännare 10	Vägg hög

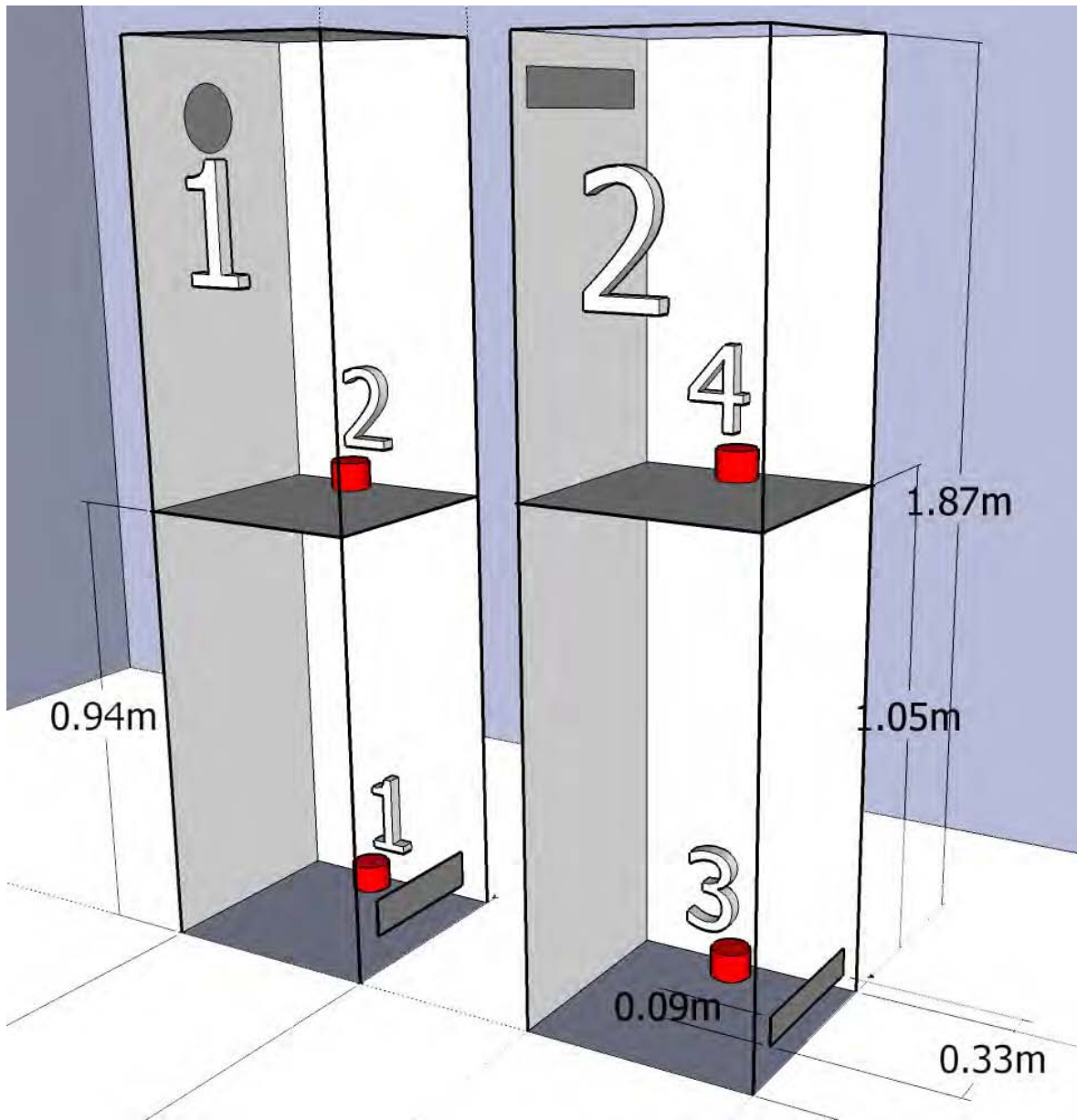


Figure C.4. Positions of the flames in the cabinets.

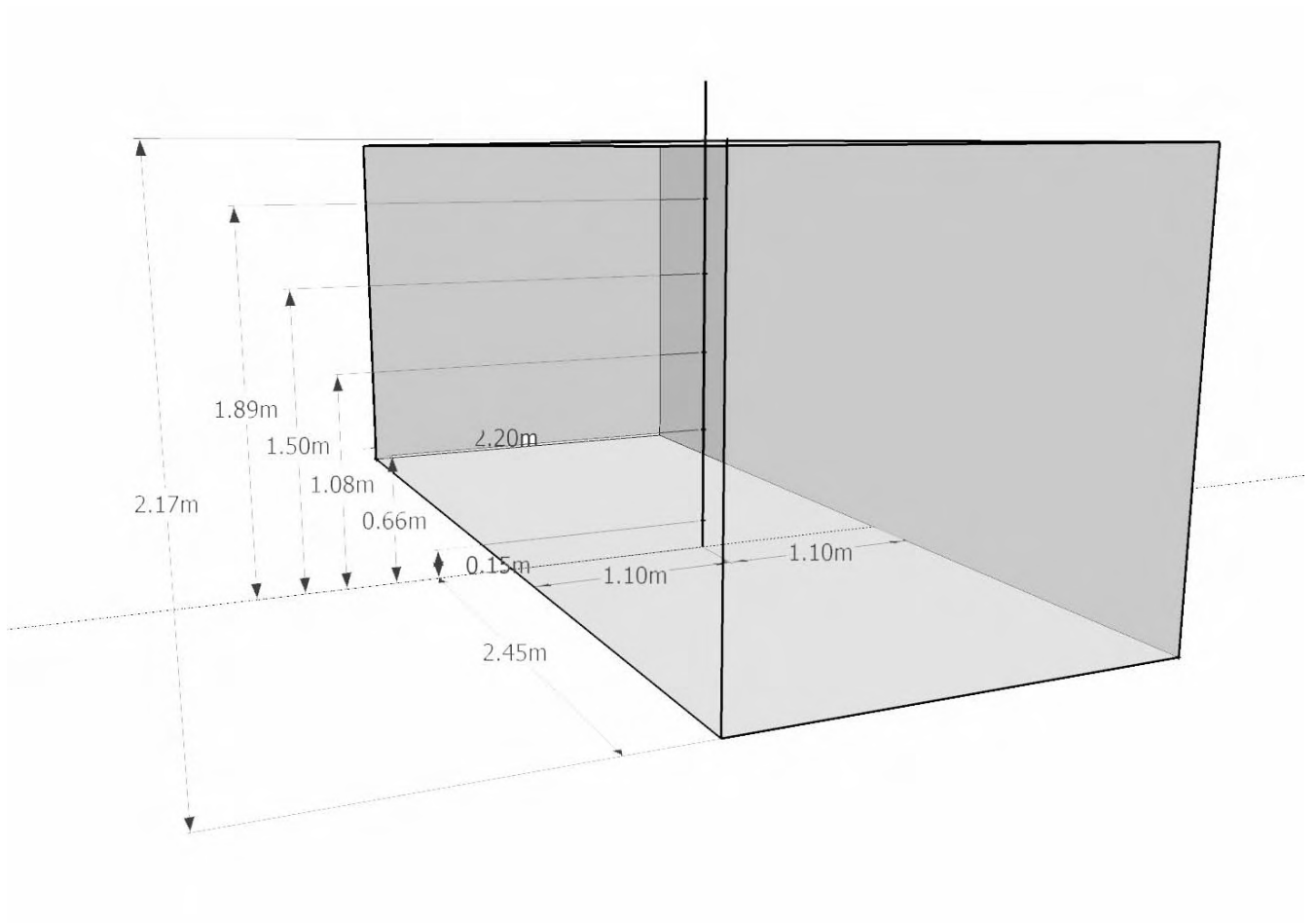


Figure C.5. Positions of the thermocouples.

Bilaga D - Resultat från småskaleförsöken

Svagströmsförsök

Resultaten från samtliga svagströmsförsök redovisas på de följande uppslagen.

Utan släckning

Kort 1 i försöket med produkt B (Figur D.8) visar ett negativt resultat, vilket var resultatet av en kortslutning i mätkablaget. Grafen redovisas även om resultatet är felaktigt.

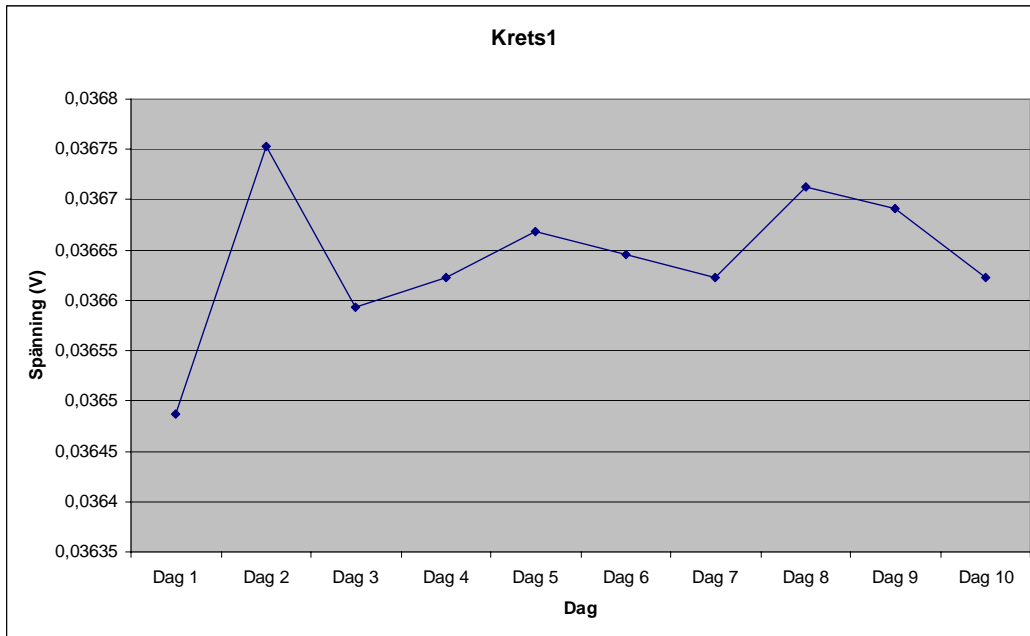


Figure D.1. Change of voltage over circuit 1, product A.

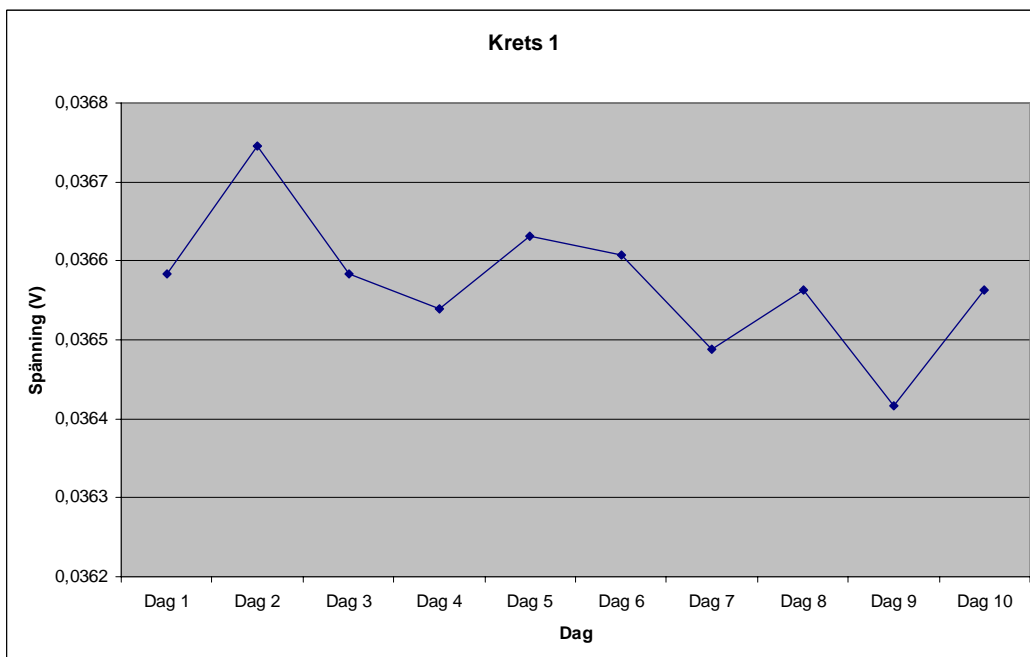


Figure D.2. Change of voltage over circuit 1, product B.

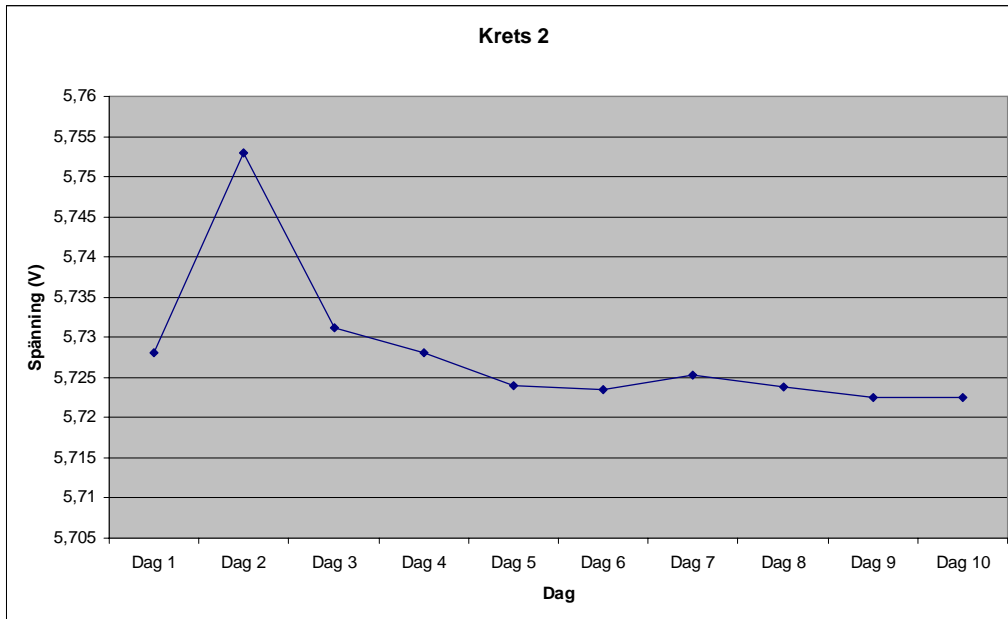


Figure D.3. Change of voltage over circuit 2, product A.

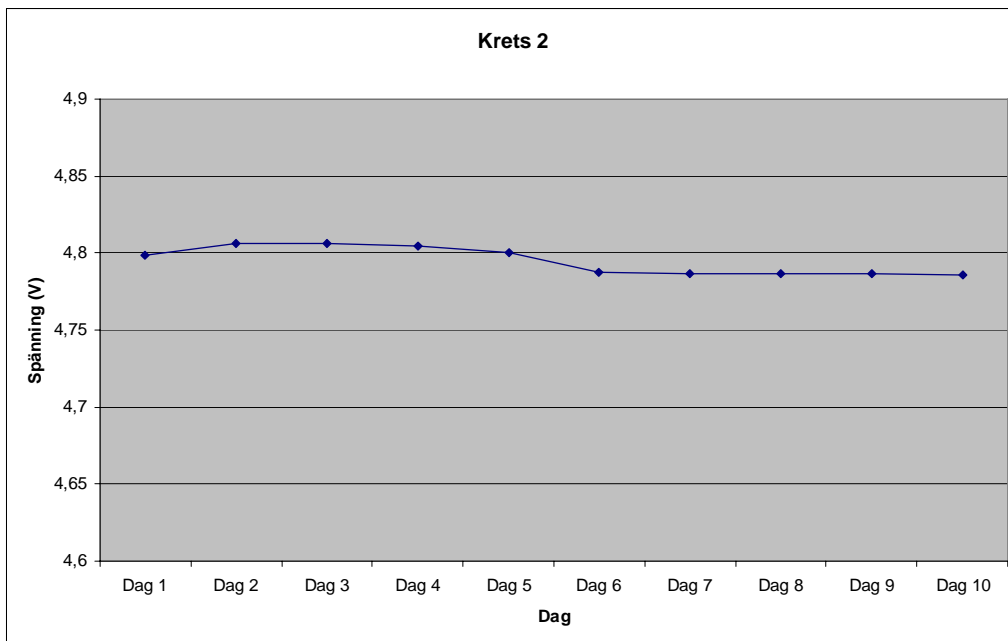


Figure D.4. Change of voltage over circuit 2, product B.

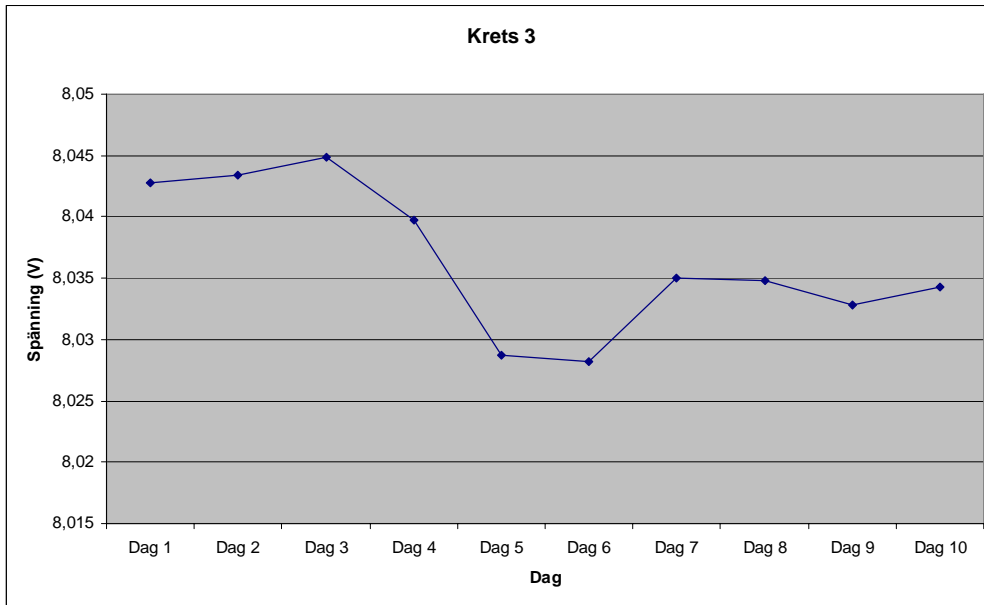


Figure D.5. Change of voltage over circuit 3, product A.

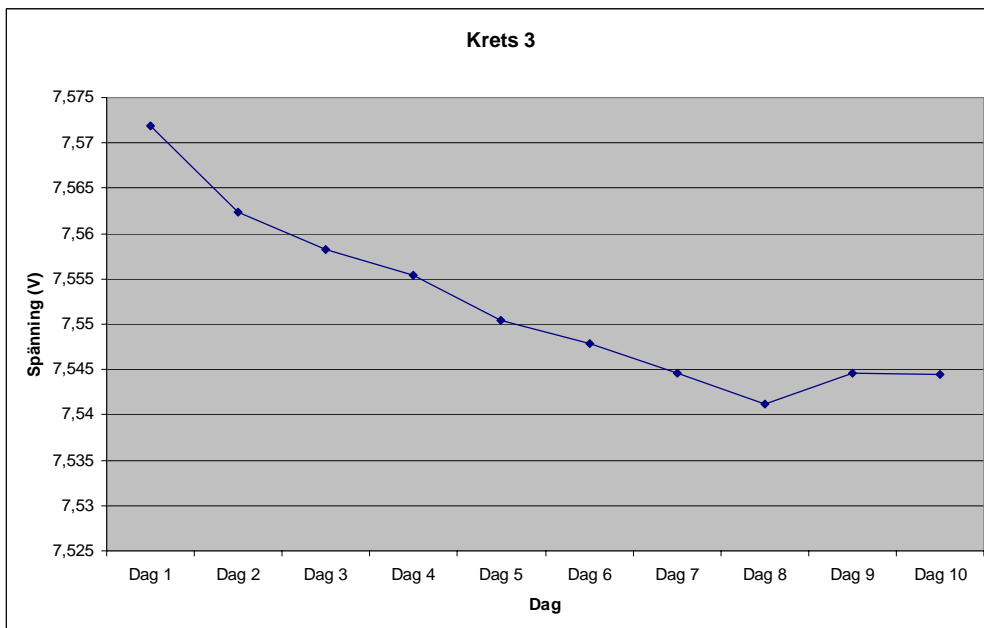


Figure D.6. Change of voltage over circuit 3, product A.

Med släckning

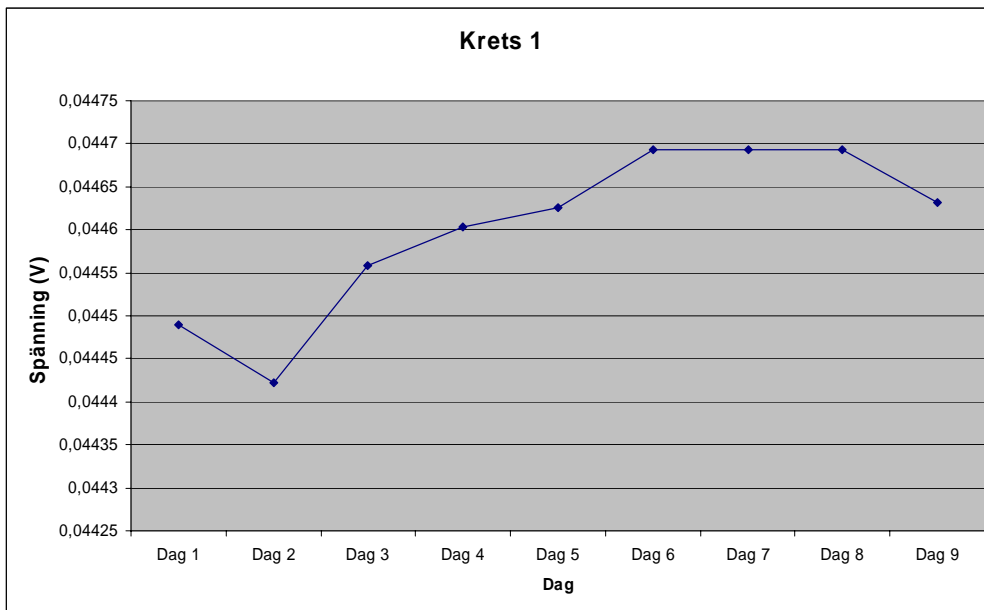


Figure D.7. Change of voltage over circuit 1, product A.

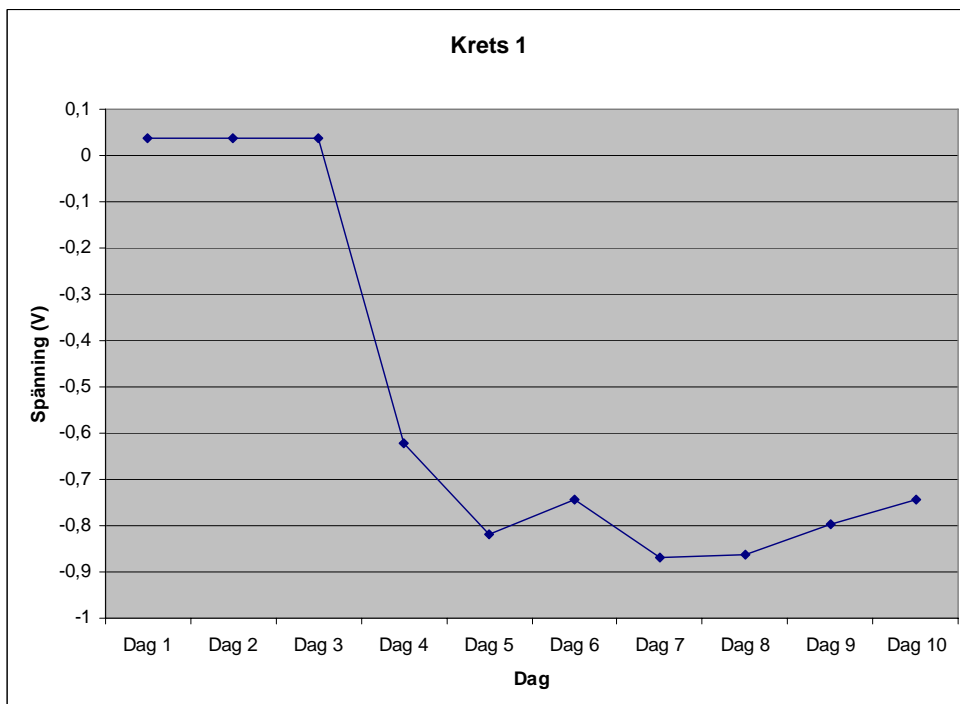


Figure D.8. Change of voltage over circuit 1, product B. An equipment malfunction occurred during this experiment and the results are therefore misleading.

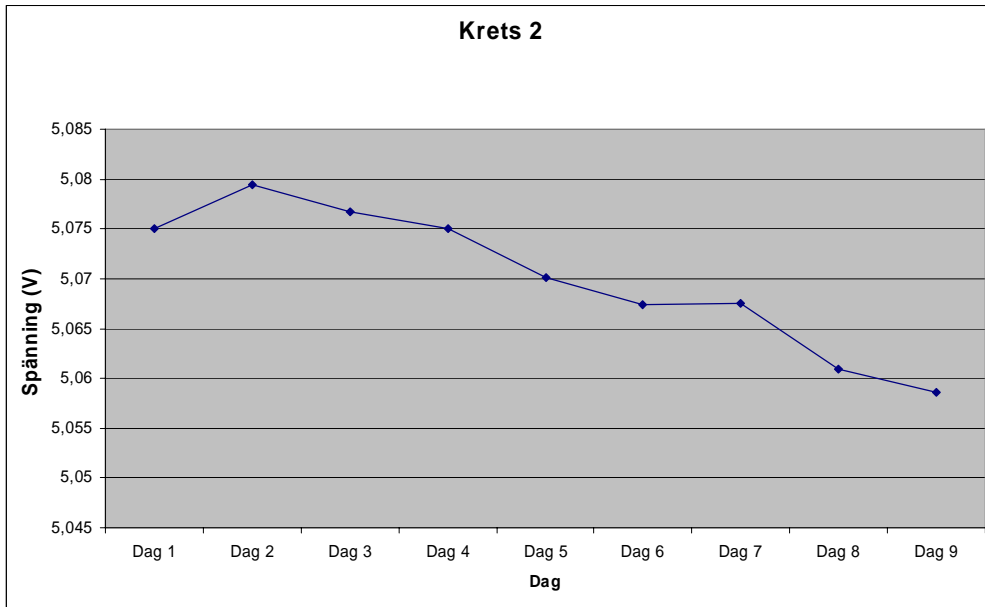


Figure D.9. Change of voltage over circuit 2, product A.

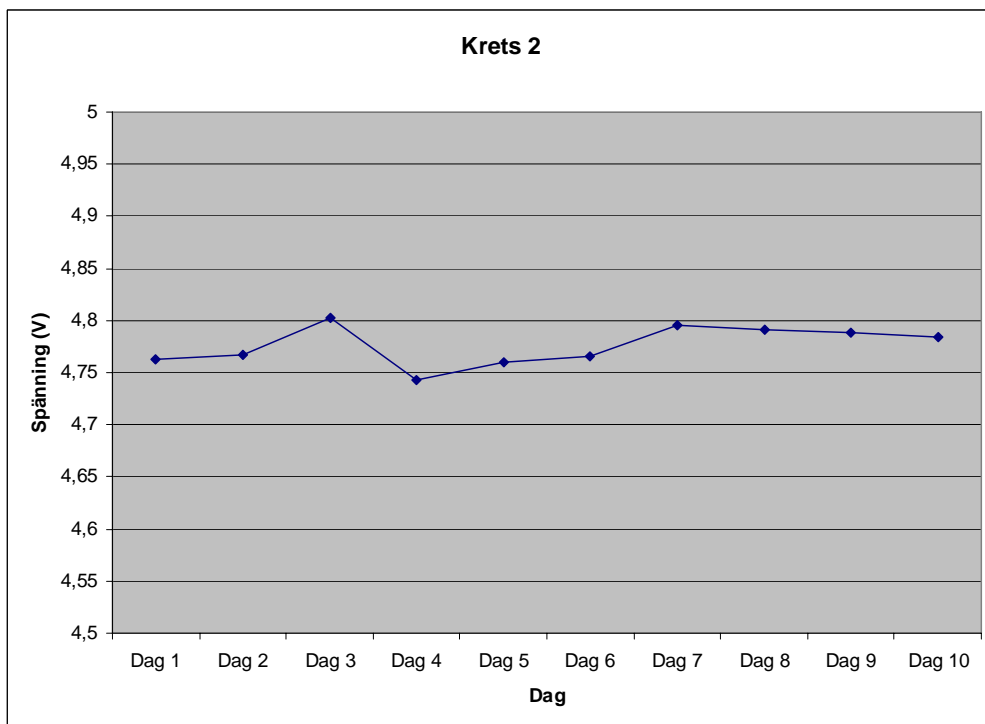


Figure D.10. Change of voltage over circuit 2, product B.

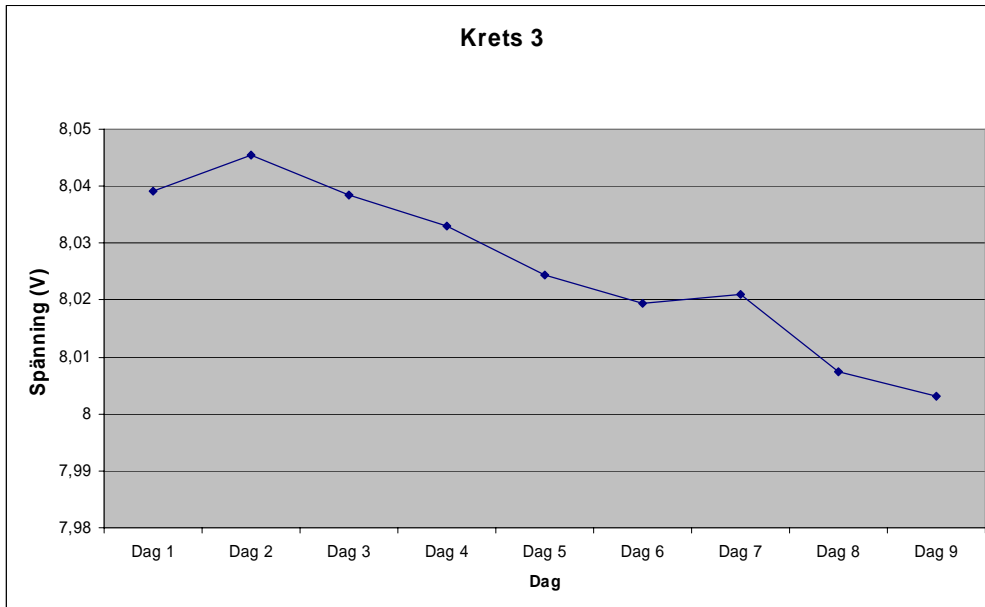


Figure D.11. Change of voltage over circuit 3, product A.

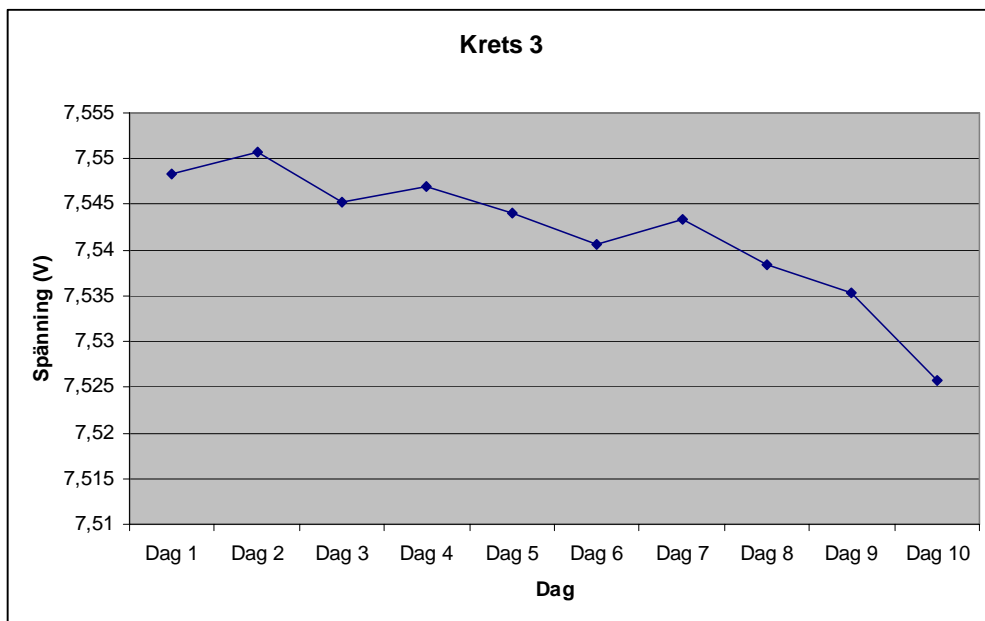


Figure D.12. Change of voltage over circuit 3, product B.

Ljudnivå

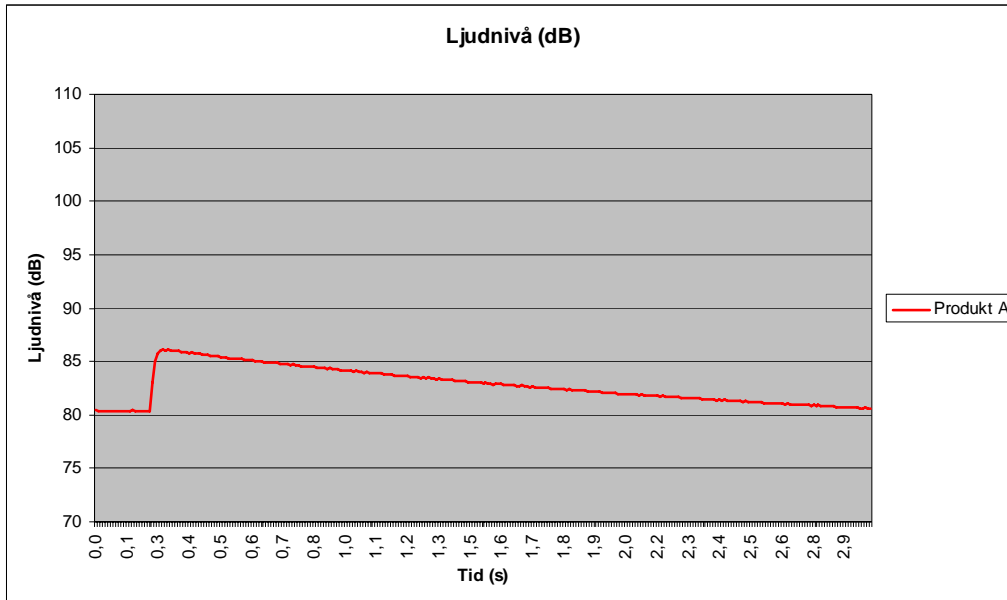


Figure D.13. Measured sound level, product A.

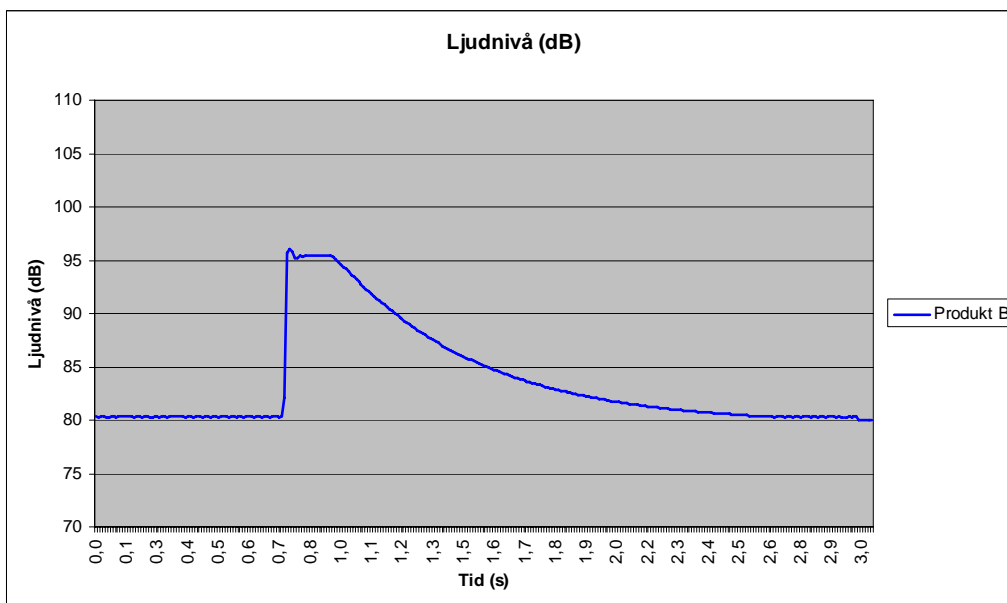


Figure D.14. Measured sound level, product B.

Tryckuppbyggnad

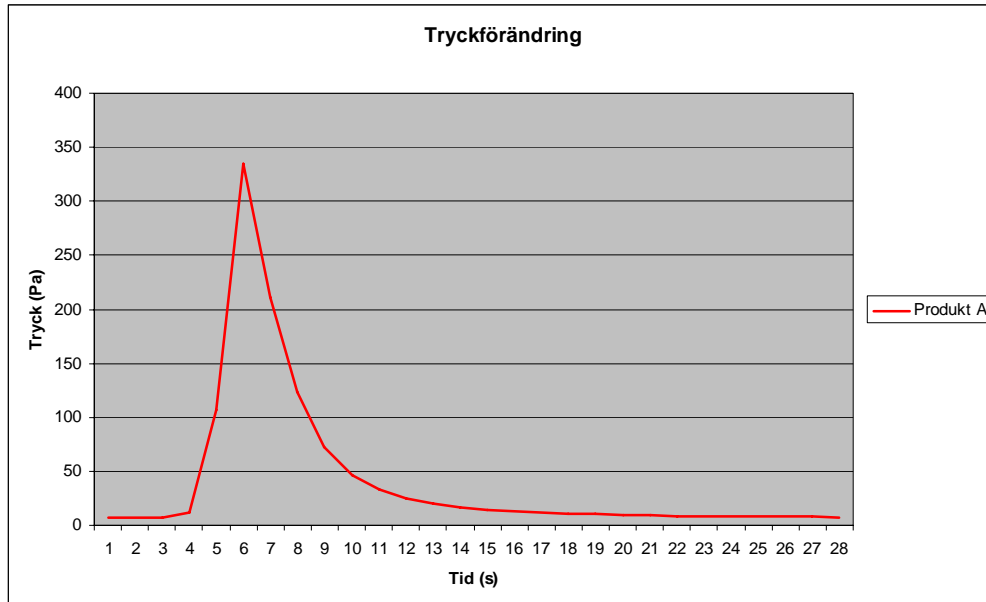


Figure D.15. Pressure in the box when a 20 g product A is activated.

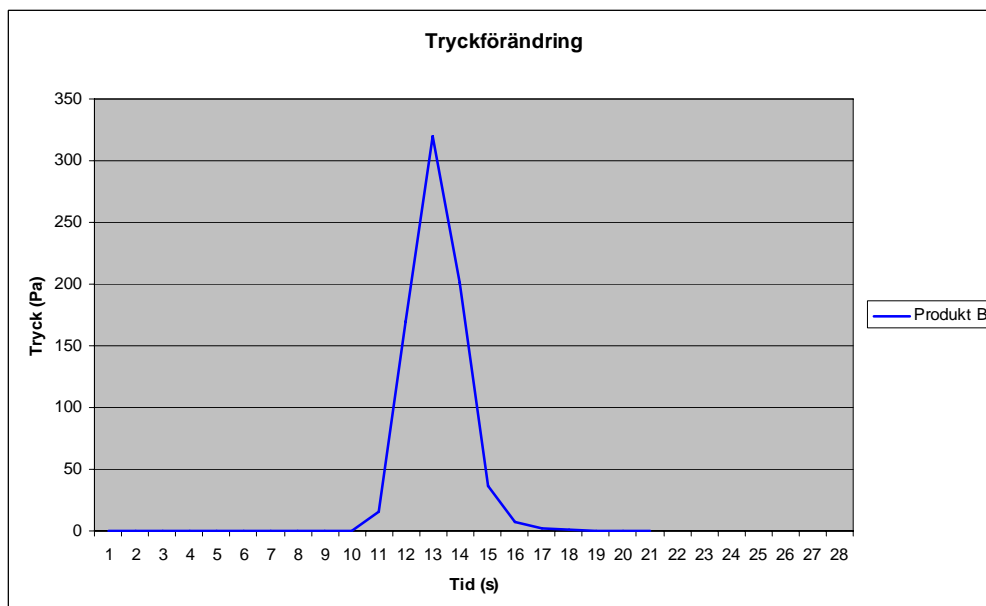


Figure D.16. Pressure in the box when a 20 g product B is activated..

Utlösningstid

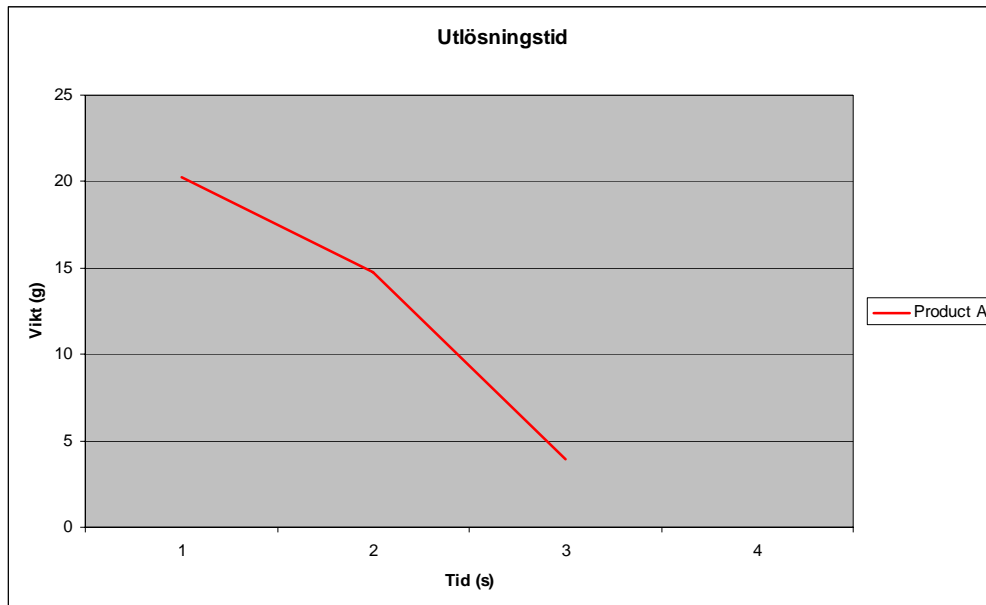


Figure D.17. Release time for a 20 g product A.

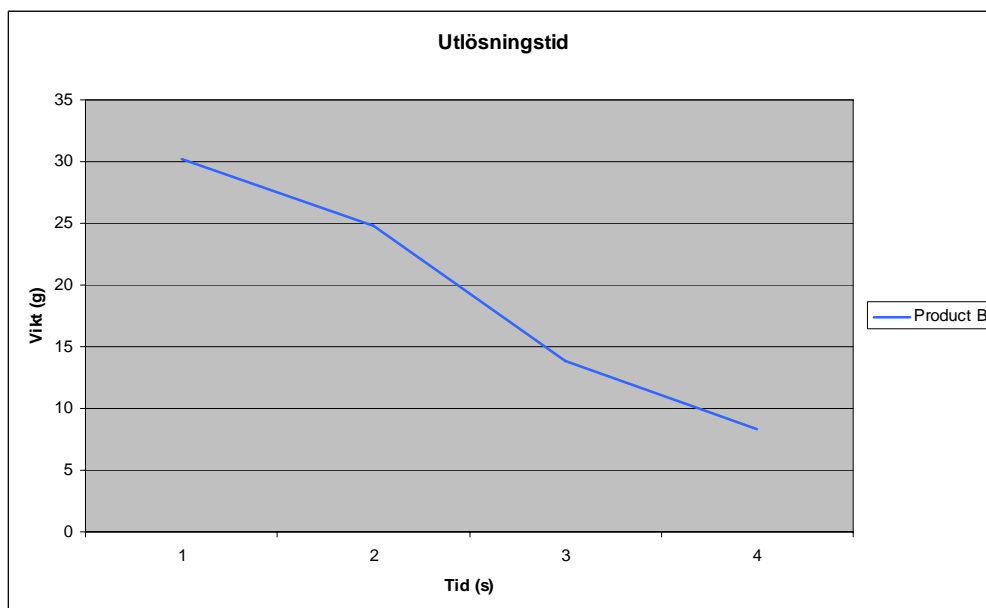


Figure D.18. Release time for a 30 g product B.

Partikelstorlek och masskoncentration

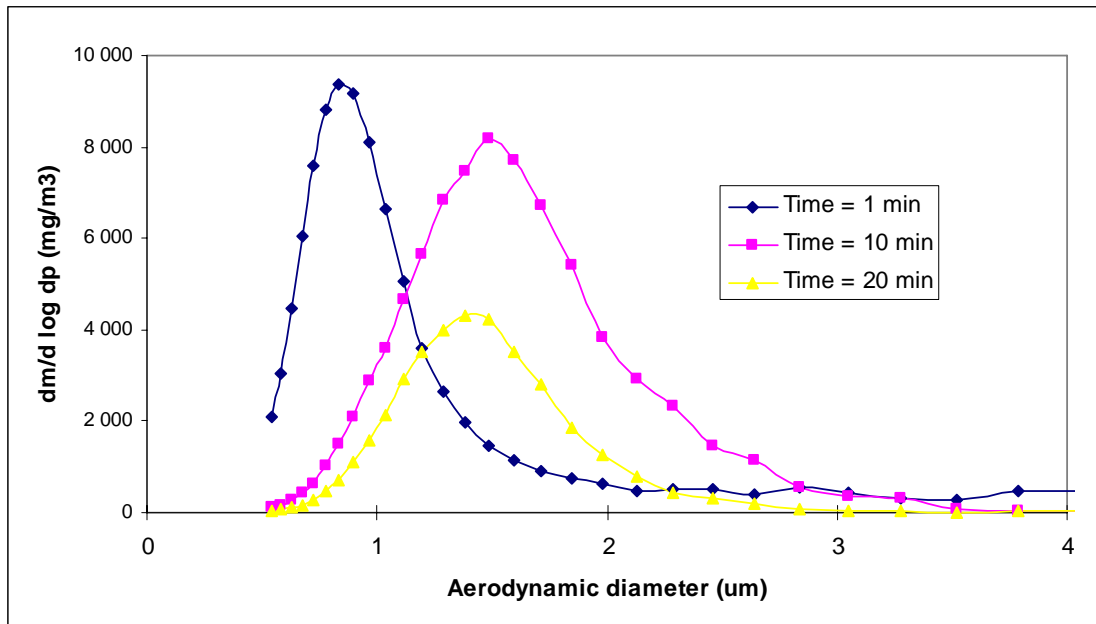


Figure D.19. Mass distribution/aerodynamic diameter (μm) over time.

Exp. No	Nominal conc. (g/m^3)		Measured mass conc. (g/m^3)	PM1/PM5	Estimated initial mass conc.* (g/m^3)	Calculated Efficiency**
Produkt A	40	< 1 μm	0.29	13%		
		< 5 μm	2.17		2.9	7.2%
Produkt A med flamme	40	< 1 μm	0.45	9%		
		< 5 μm	5.01		4.3	11.1%
Produkt B	60	< 1 μm	0.15	8%		
		< 5 μm	1.81		4.0	6.7%
Produkt B med flamme	60	< 1 μm	0.22	7%		
		< 5 μm	3.20		7.1	7.1%

Figure D.20. Factory concentration and real concentration.

Bilaga E – Resultat från högspänningsförsök

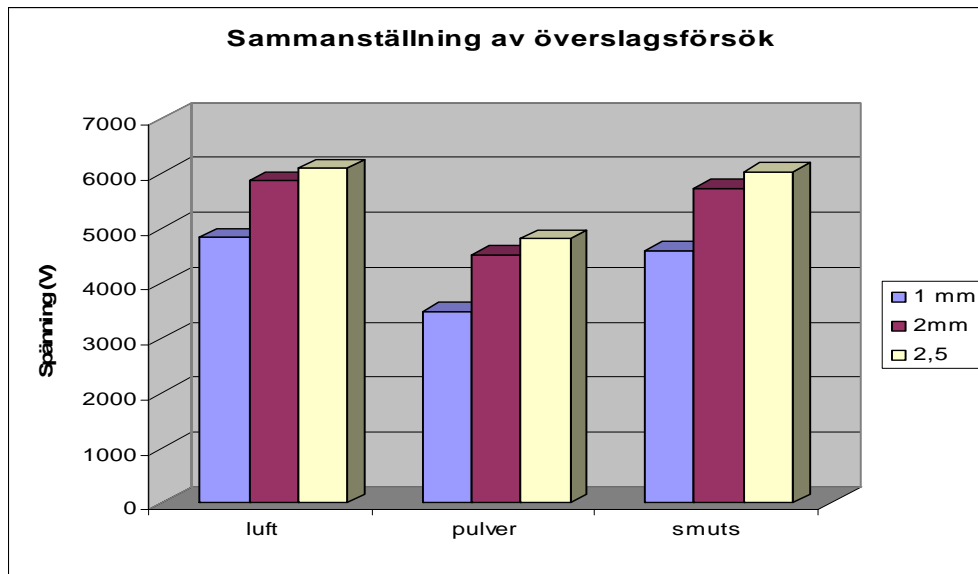


Figure E.1. Compilation of the high voltage experiments, product A.

1mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %	Smutsig	Sänkning %
4832	3481	28,0	4590	5,0

2mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %	Smutsig	Sänkning %
5868	4518	23,0	5734	2,3

2,5mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %	Smutsig	Sänkning %
6092	4814	21,0	6033	1,0

Table E.1→5E3. Compilation of the change of spark energy in the high voltage experiments, product A.

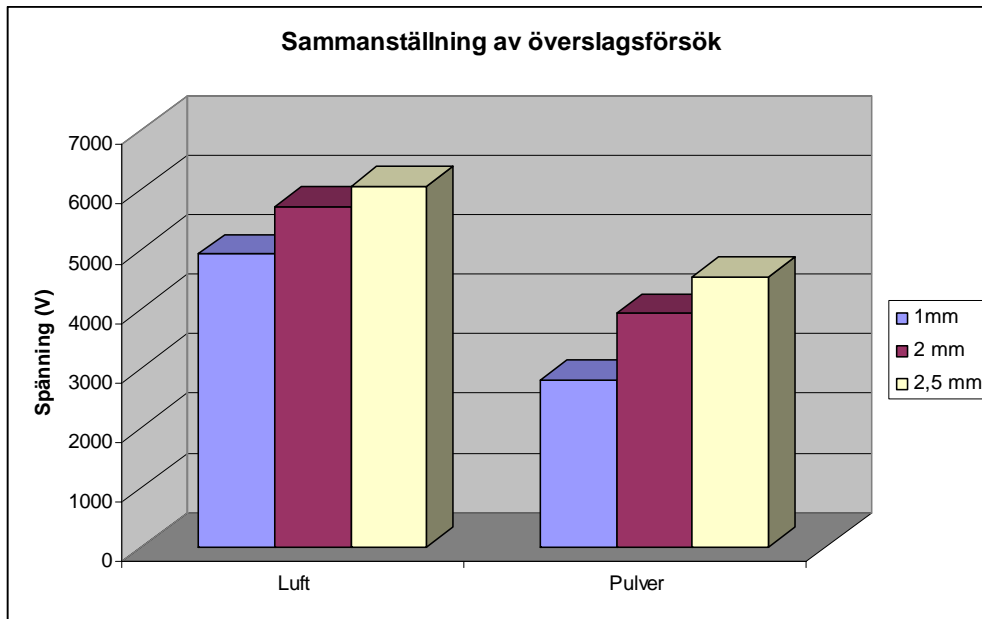


Figure E.2. Compilation of the high voltage experiments, product B.

1mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %
4917	2809	43,0

2mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %
5716	3914	22,0

2,5mm

Utan pulver	Med pulver	Sänkning %
6063	4539	26,0

Table E.4→5E6. Compilation of the change of spark energy in the high voltage experiments, product B.

Bilaga F - Resultat från fullskaleförsöken

Släckförsök av utvändiga bål

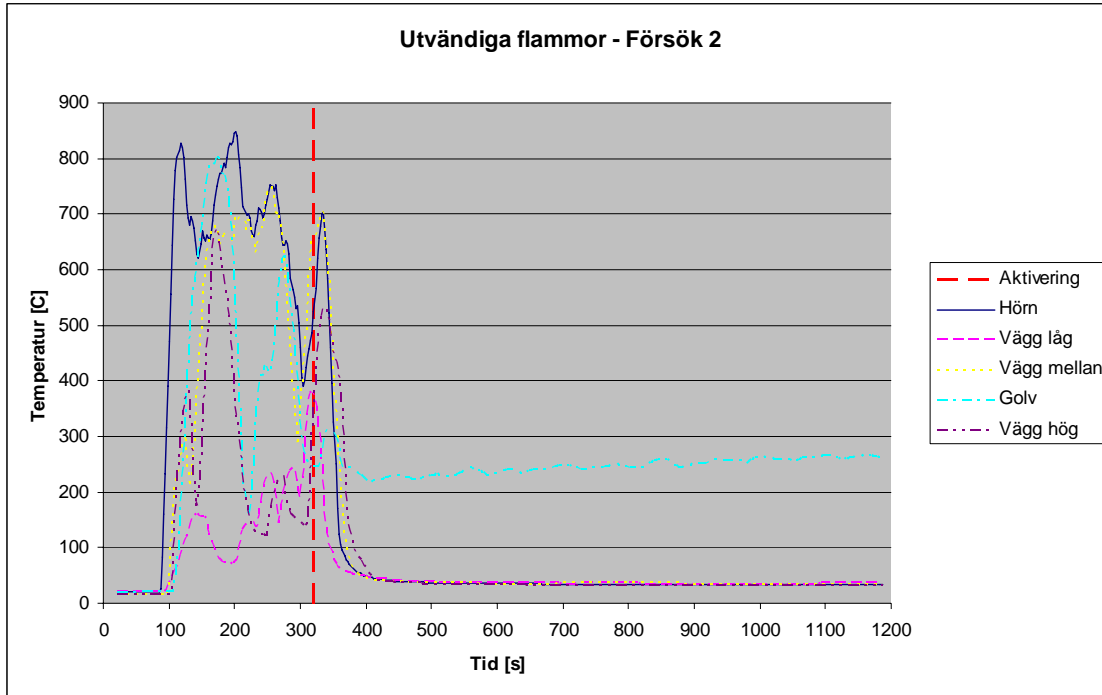


Diagramme F.1. Flame extinguishing times, product A.

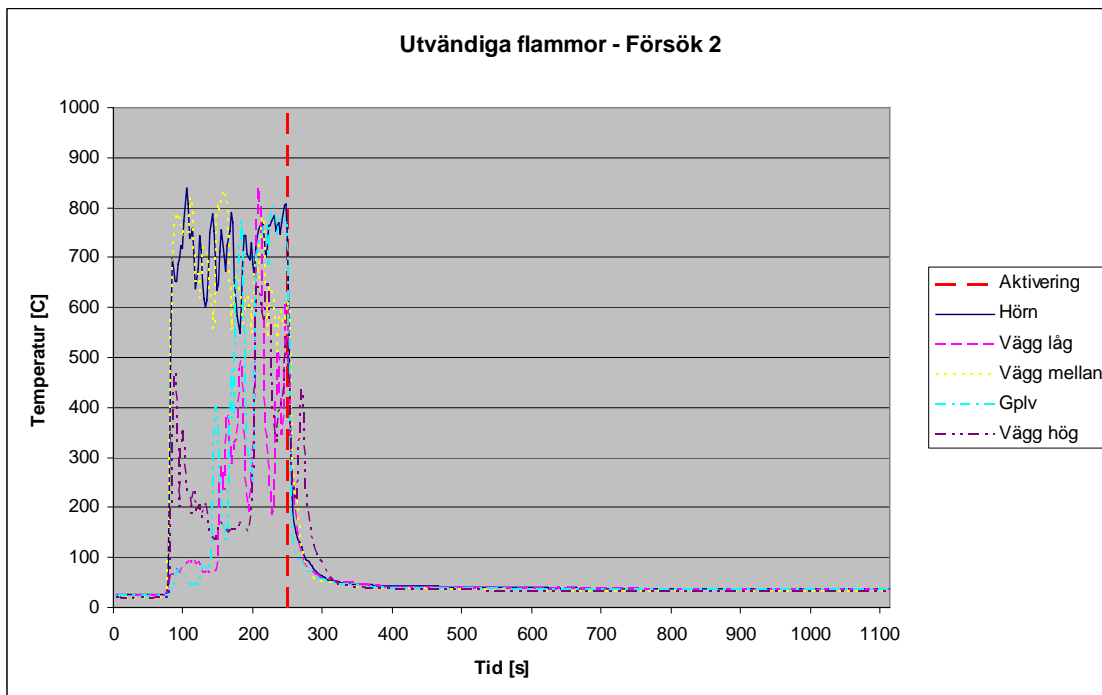


Diagramme F.2. Flame extinguishing times, product B.

F.2 - Släckförsök av invändiga bål

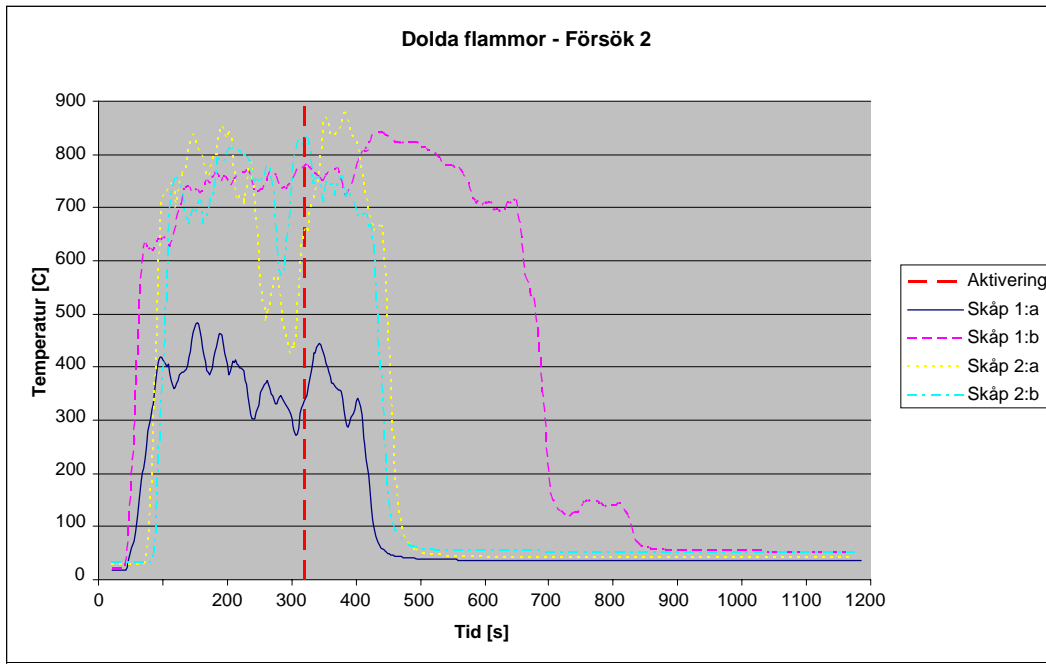


Diagramme F.3. Flame extinguishing times, product A.

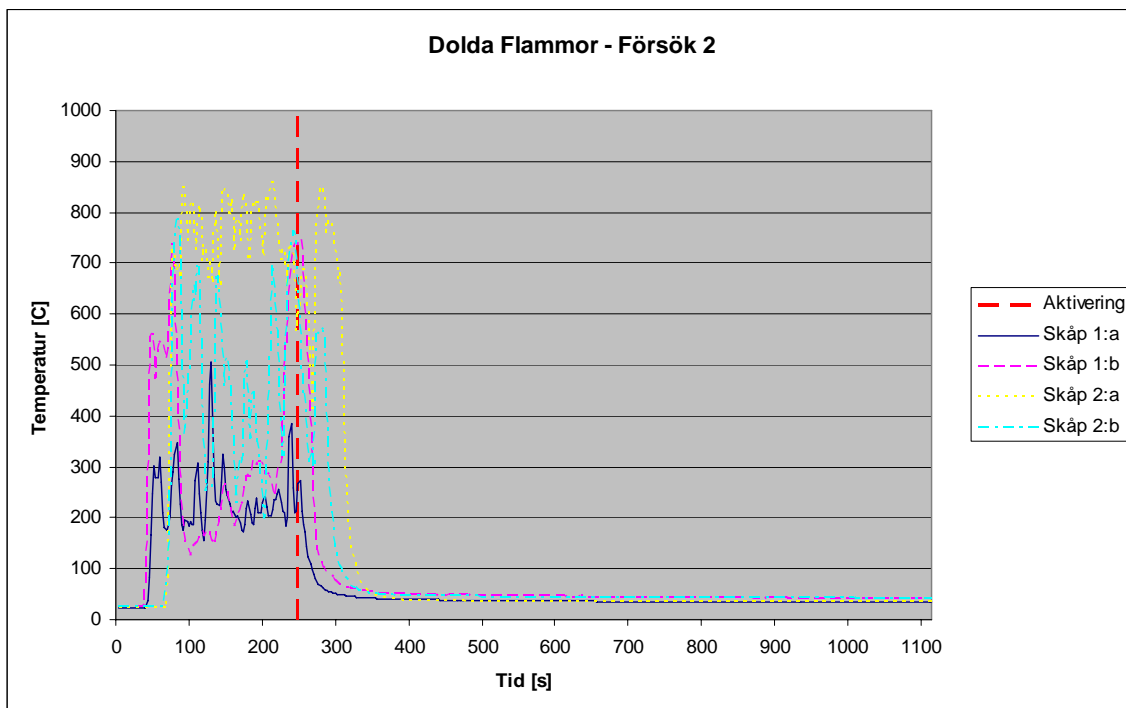


Diagramme F.4. Flame extinguishing times, product B.

Temperaturmätningar i containern

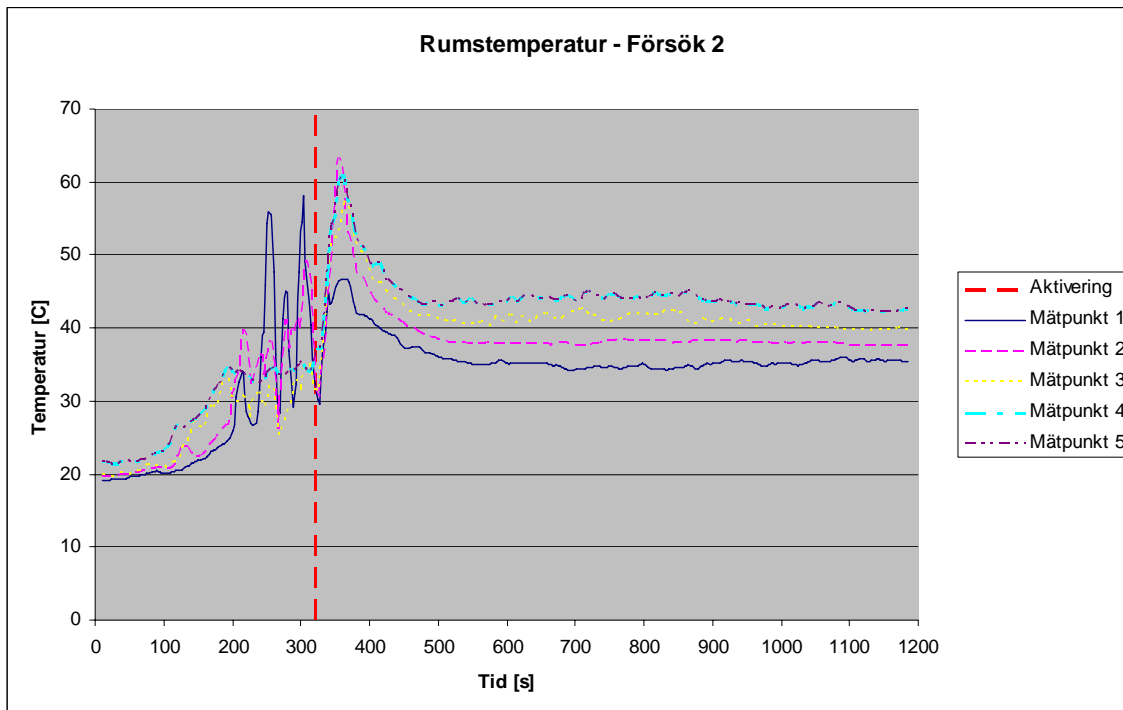


Diagramme F.5. Change in room temperature, product A.

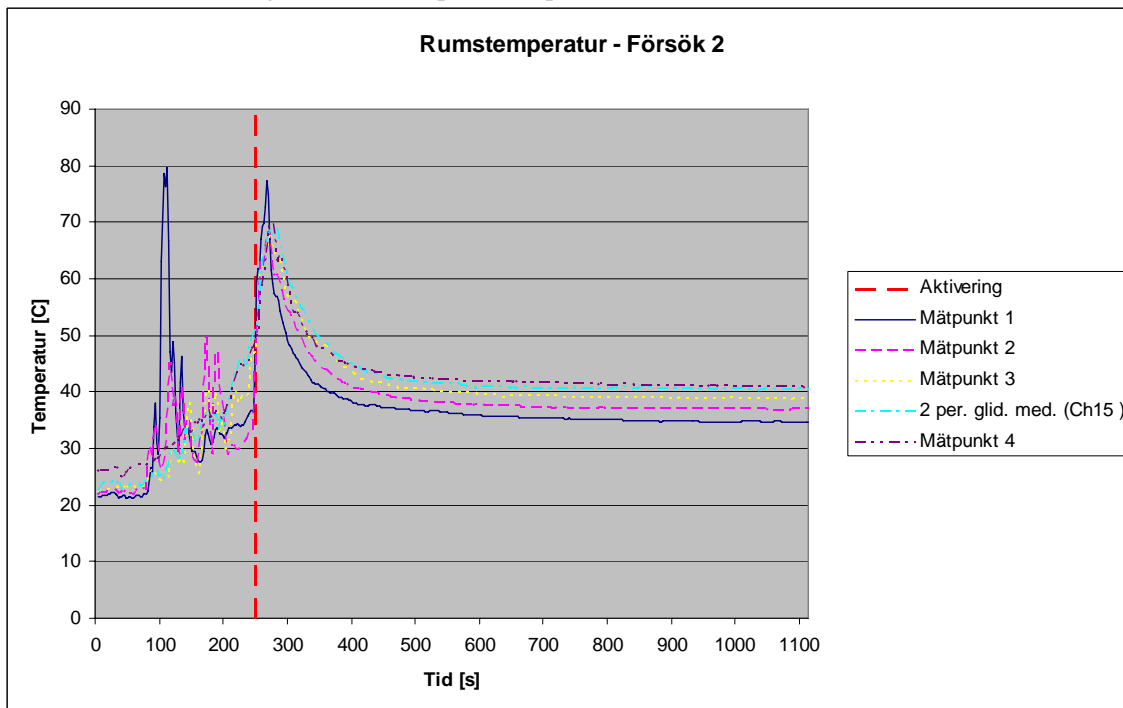


Diagramme F.6. Change in room temperature, product B.

Bilaga G – Sikttabell

Table - Visibility as a Function of Particle MMAD and Concentration											
Particle Size MMA D (μm)	Visibility (cm) at Varying Concentrations										
	10 mg/m ³	1,000 mg/m ³	10,000 mg/m ³	20,000 mg/m ³	30,000 mg/m ³	40,000 mg/m ³	50,000 mg/m ³	70,000 mg/m ³	90,000 mg/m ³	110,000 mg/m ³	130,000 mg/m ³
10	285,600.0	2,856.0	285.6	142.8	95.2	71.4	57.1	40.8	31.7	26.0	22.0
9	248,400.0	2,484.0	248.4	124.2	82.8	62.1	49.7	35.5	27.6	22.6	19.1
8	207,600.0	2,076.0	207.6	103.8	69.2	51.9	41.5	29.7	23.1	18.9	16.0
7	177,600.0	1,776.0	177.6	88.8	59.2	44.4	35.5	25.4	19.7	16.1	13.7
6	156,000.0	1,560.0	156.0	78.0	52.0	39.0	31.2	22.3	17.3	14.2	12.0
5	139,200.0	1,392.0	139.2	69.6	46.4	34.8	27.8	19.9	15.5	12.7	10.7
4	123,600.0	1,236.0	123.6	61.8	41.2	30.9	24.7	17.7	13.7	11.2	9.5
3	114,000.0	1,140.0	114.0	57.0	38.0	28.5	22.8	16.3	12.7	10.4	8.8
2	81,600.0	816.0	81.6	40.8	27.2	20.4	16.3	11.7	9.1	7.4	6.3
1	25,200.0	252.0	25.2	12.6	8.4	6.3	5.0	3.6	2.8	2.3	1.9
0.8	15,600.0	156.0	15.6	7.8	5.2	3.9	3.1	2.2	1.7	1.4	1.2
0.6	12,000.0	120.0	12.0	6.0	4.0	3.0	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9
0.1	163,200.0	1,632.0	163.2	81.6	54.4	40.8	32.6	23.3	18.1	14.8	12.6

Table G.1.

Bilaga H

Bilaga H

Aerosol measurements and health effects of pyrotechnically generated aerosols

Mats Bohgard
Anders Gudmundsson

Department of Design sciences
Division of Ergonomic and Aerosol Technology
Lund University, Sweden

CONTENTS

1	Introduction	3
2	Aerosol measurements	3
2.1	Experimental set-up	3
2.2	Results	6
3	Literature study of health effects	13
4	Summary and discussions	15
5	Conclusions	17
	References	17
	Appendix A	18

Abbreviations

APS	Aerodynamic particle sizer
MMAD	Mass median aerodynamic diameter
PGA	Pyrotechnically Generated Aerosol

1 Introduction

In connection with studies of pyrotechnically generated aerosol system (PGA) performed by Ekström and Nilsson (2008) measurement of the generated airborne particles was performed. The aims were to characterize: the particle size distribution, mass concentration and chemical composition.

A literature study was performed to obtain knowledge about health effects of inhalation of PGA. The health effects caused by gases are not considered.

2 Aerosol measurements

2.1 Experimental set-up

Four different experiments was performed, Table 1. Tested fire extinguishing aerosol generators were A and B. For more detailed information about the experiments refer to Ekström and Nilsson (2008).

Exp no	Manufacture of PGA	Fire
1	A	No
2	A	Yes
3	B	No
4	B	Yes

Table 1. Experiments when aerosol measurements were performed.

The PGA cartridges were placed in a box with volume of 0,48 m³ (0.55 m x 0.55 m x 1.65 m, BxDxH) without any ventilation. The amount of bulk materials are calculated using the manufacture's recommendations that a required nominal particle mass concentration of 60 g/m³ is obtained and is later, referred as nominal aerosol mass concentration. After ignition the generated airborne particles were enclosed in the box. Each system, A and B, was tested with and without fire in the box. In the experiments with fire 3 cl of heptanes was burning about 10 seconds before the PGA was triggered. The box was almost airtight, but a small part of the aerosol could blow out of the box in connection with the ignition.

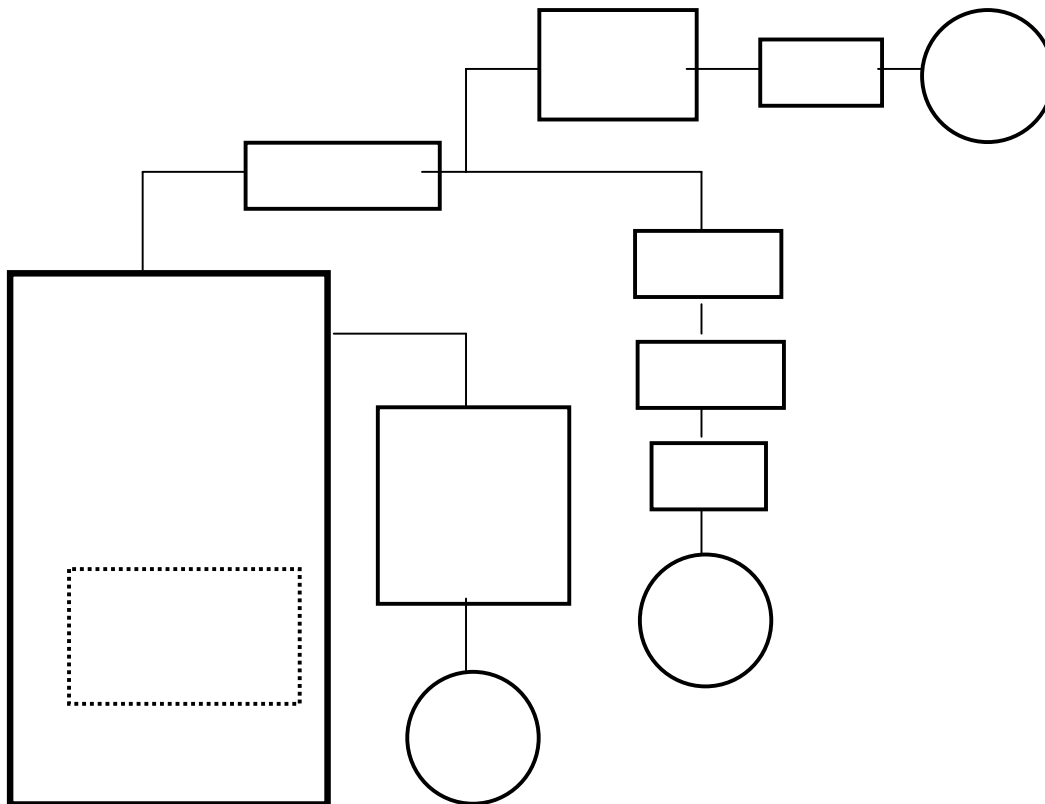


Figure 1 Experimental set-up of the aerosol measurements

Figure 1 shows the experimental set-up of the aerosol measurement. Using a tube, diameter 6 mm, connected to the top of the box the aerosol was sampled with a flow rate of 5 litre/min and measured using an Aerodynamic particle sizer (APS, (model 3321, TSI Inc., USA)), which measure in real time the aerodynamic particle diameter in the size range, 0.5 to 20 μm . The sampling was started about 30 seconds after ignition. As the particle concentration was extremely high, g/m^3 , the aerosol was diluted using two diluters (model 3302, TSI Inc., USA), which each diluted the aerosol 100 times. Before the aerosol enters the diluters the aerosol was sucked through a precollector using a cyclone with an aerodynamic cutoff diameter of about $\sim 15 \mu\text{m}$. The cyclone should prevent large agglomerates to clog the diluters. However, the first diluter often clog, which means a short time of cleaning, about 30-60 sec, and no APS was obtained during that time. The cutoff diameter was much larger than the generated particles. The cutoff diameter is about three times larger than the 90% quartile of 5 μm reported by the B manufacture (Fireaway LLC, Minnesota, USA). Kimmel et al (1995) has measured the particle size distribution of SPE (Spectrex Inc, USA) and the initial mass median aerodynamic diameter (MMAD) was in the range 2.4 to 3.0 μm .

The APS measure the number size distribution and assuming a particle density the mass size distribution and total mass concentration can be calculated.

The total mass concentration has also been measured using filters. Using a pump the aerosol in the box was sampled at a flow rate of 5 litre/min through a filter (Millipore[®], pore size 0.8 μm).

The sampling time was short, in the range 10-60 seconds and started about 7 minutes after ignition. Before entering the filter the aerosol was passing an impactor, which was changed between a cutoff diameter of 5 or 1 μm . Subsequently, the filters were weighed using a balance with an accuracy of 0.01 mg and the total mass concentration was obtained. The filters were also analyzed using Particle Induced X-ray Emission (PIXE), which gives the mass of all elements from Alumina and larger.

The aerosol was also sampled using a cascade impactor with 12 stages that separate the airborne particles in different particles sizes according to their aerodynamic particle diameter in the range, 0.04 to 12 μm . No precollector was used and the sample flow was 10 l/min and the sampling time was 30 seconds. The cascade impactor measurements were performed for A without fire (Exp. No 1) and B with fire (Exp. No 4).

The particle measurements performed and results that could be obtained by the different methods are summarized in Table 2.

Method		Number size distribution,	Mass size distribution	Total mass concentration	Chemical composition	
APS	Real-time measurement	Measured in the range 0.5 to 20 μm	Estimation from number size distr.	Estimation from mass distribution		
Millipore filter	Analyze of filter			Balance	Elemental analyze, PIXE	
Cascade impactor	Analyze of filter		Relative using PIXE		Elemental analyze, PIXE	

Tabell 2 The different aerosol measurement used in the study..

2.2 Results

Particle characterisation

Figure 2 shows the generated particle mass concentration in the box versus time using the APS. The concentration is decreases by time.

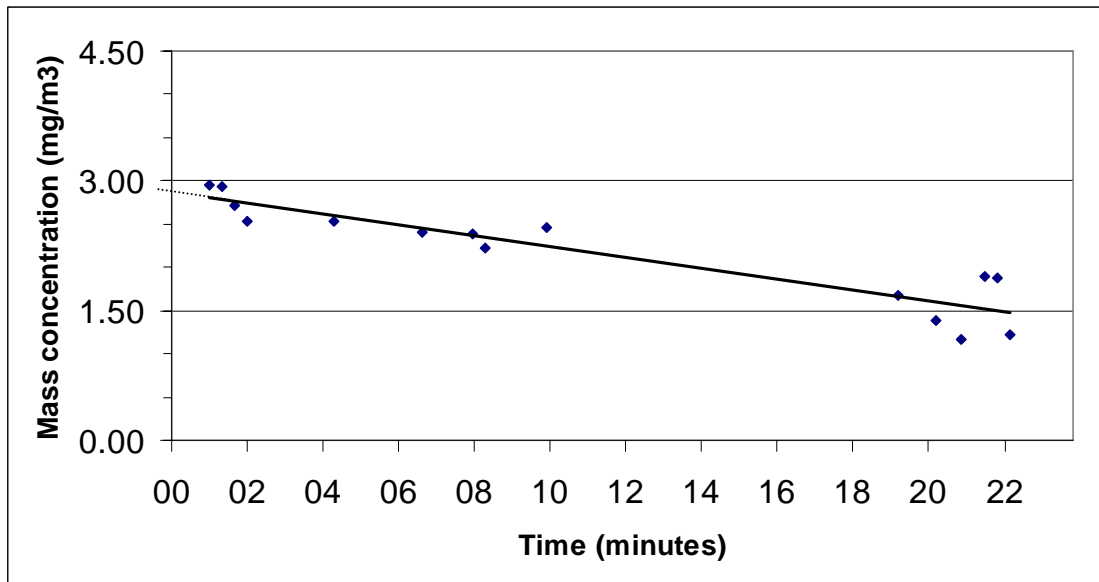


Figure 2 The decay of the mass concentration in the box measured using an APS.

It should be noted that the box is not ventilated, except the samplings flows to the APS and filter measurements and therefore no exponential decay is obtained. The decrease of the concentration is mainly caused by sedimentation to the floor area of the box, but some minor deposition also occurred to all surfaces caused by (turbulent) diffusion.

Assuming the only deposition mechanism is sedimentation an equivalent ventilation rate can be calculated from the sedimentation velocity of an airborne particle. The sedimentation is proportional the square of the particle diameter. (See Appendix A). Assuming well mixed aerosol an approximate half-time can be calculated. For a particle with an aerodynamic particle diameter of $3\ \mu\text{m}$ the half-time will be ~ 60 minutes. For $5\ \mu\text{m}$ particle the half-time will be ~ 20 minutes. These values are in same range as measured and shown in Figure 2. This means that sedimentation will be the main deposition mechanism in a non-ventilated room and the half-time will be about an half hour.

Figure 3a, b shows how the number and mass size distribution A (Exp No 1), respectively, is changed towards lower concentrations and the distribution are shifted towards larger sizes. The shift is caused by agglomeration caused by the high number concentration. Figure 4 shows for B how the mass median aerodynamic diameter is shifted versus time. Initial the MMAD is about $1\ \mu\text{m}$ and after 2 hour it has been shifted to about $2.3\ \mu\text{m}$. The wideness of the distribution is

determined as the geometric standard deviation of the distribution ($\sigma_g = 1$ means monodisperse aerosol).

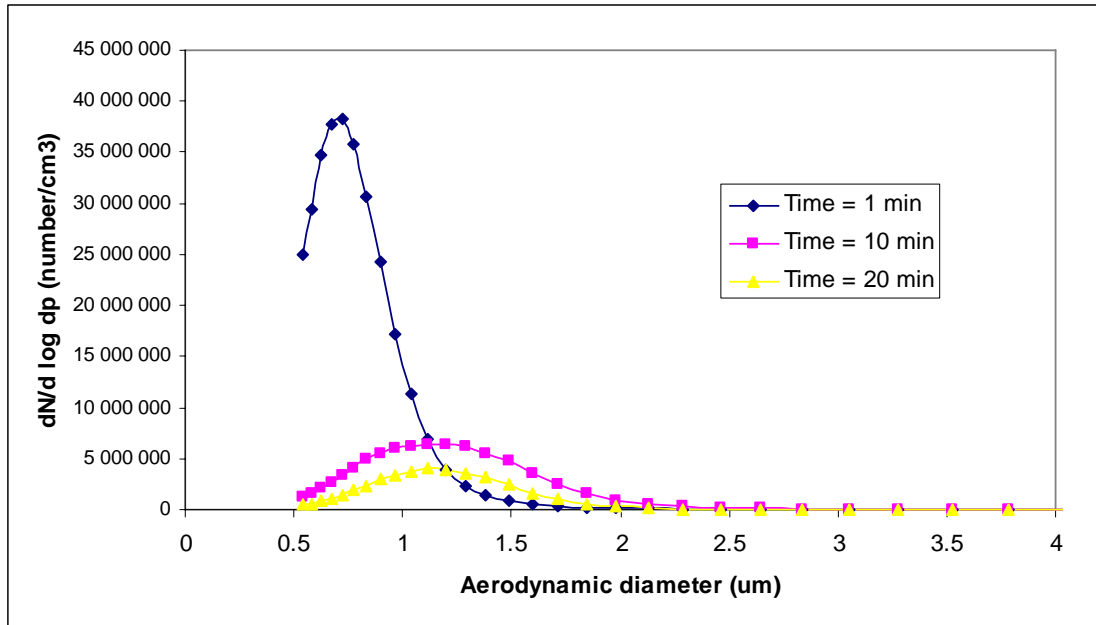


Figure 3a. Number size distribution measured using an APS.

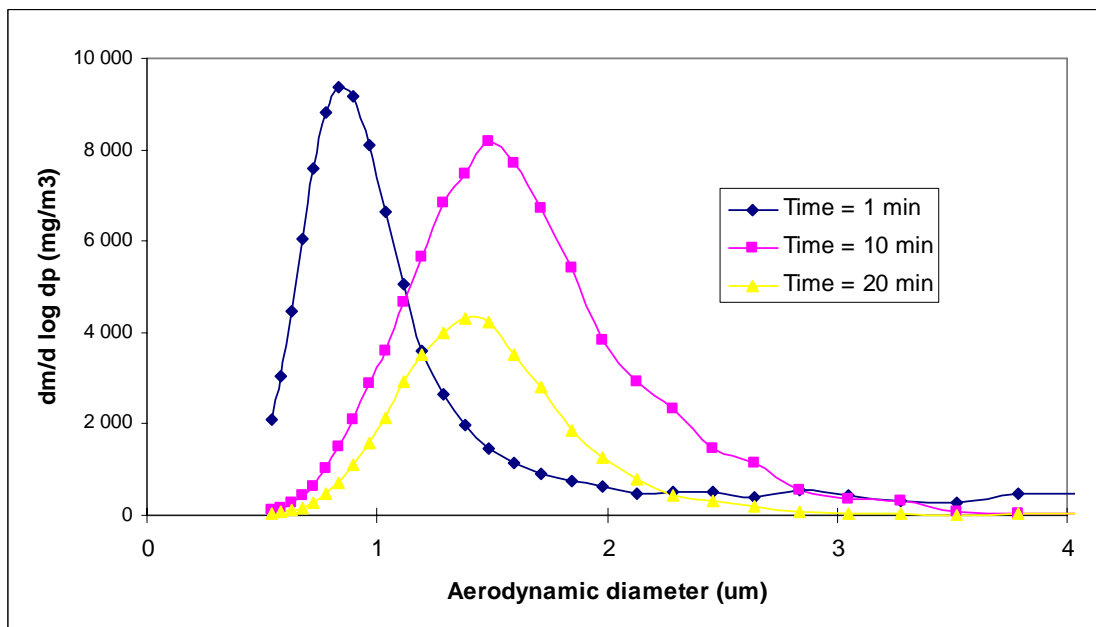


Figure 3b. Mass distribution measured using an APS.

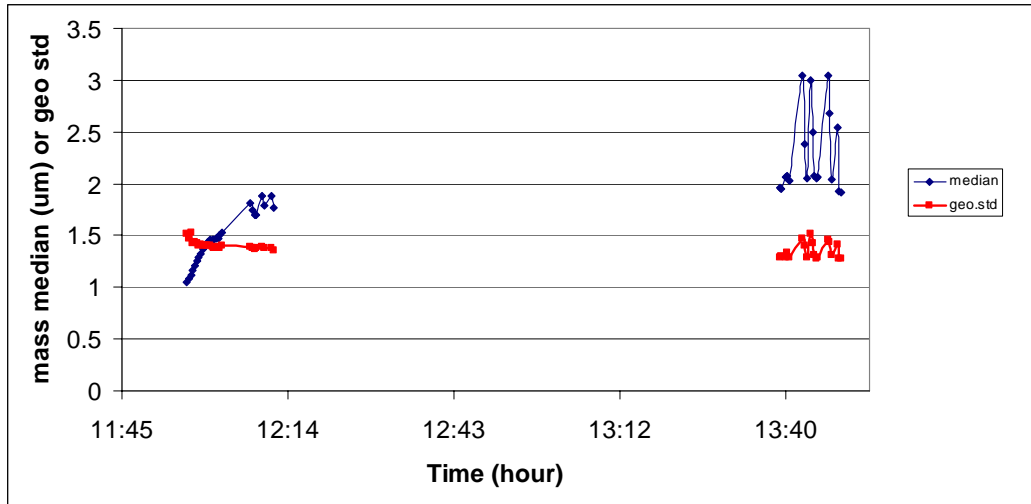


Figure 4. Mass median aerodynamic diameter and geometric standard deviation of B versus time.

The mass concentrations determined using collection on filters are shown in Table 3. The APS measurements have been used to estimate the decay of the particle mass concentration. This information has then been used to estimate the initial concentration in the box. The measured mass concentrations were much lower than the nominal concentration. The efficiencies of the PGA were calculated as the ratio of estimated initial mass concentration and nominal mass concentration. The ratio PM1/PM5 describe the particle mass of particles less than 1 μm (PM1) compared to particles less than 5 μm (PM5). The efficiency is larger when fire was used in the box for both A and B. The increased efficiency shows that the generated particles react, as intended, with the “propagation radicals (OH, H and O) and the particle mass concentration increase.

The difference between nominal and measured particle mass concentration could be explained by following:

- The efficiency of the airborne particle generation is about 40% reported by the manufacture B in a chamber of about 3 m^3 .
- The small box used cause higher losses to the walls compared to the normal locations where the aerosol system should be used. Kimmel et al (1997) reported a reduction of the efficiency of 30%, when comparing a box of 56 m^3 to 0.7 m^3 .

Hence the efficiency in a box of 0.5 m^3 will be (approximately $0.4 \cdot 0.8$) $\sim 30\%$. The difference between 30% and measured efficiencies (4.4% - 11.1%) could be explained by following:

- The ignition causes unknown additional deposition of particles onto the walls.
- The box was not air tight, especially not at ignition, when some unknown air was blown out of the box.
- Different efficiency of particle generation of the different PGA systems.

However, the large difference between nominal concentration and measured was also observed by Kimmel et al (1995). They estimate the efficiency to be 12.3% in a chamber of 0.7 m³.

Exp. No	Nominal conc. (g/m ³)		Measured mass conc. (g/m ³)	PM1/PM5	Estimated initial mass conc.* (g/m ³)	Calculated Efficiency**
A	60	< 1 μm	0.29	13%		
		< 5 μm	2.17		2.9	4.8%
A, with fire	60	< 1 μm	0.45	9%		
		< 5 μm	5.01		4.3	11.1%
B	60	< 1 μm	0.15	8%		
		< 5 μm	1.81		4.0	4.0%
B with fire	60	< 1 μm	0.22	7%		
		< 5 μm	3.20		7.1	7.1%

* Estimated concentration shortly after ignition.

** the ratio: Estimated mass conc. / Nominal conc.

Table 3 Mass concentration obtained by gravimetric filter measurements.

Chemical composition

Figures 5a (Exp. No 1, A) and 5b (Exp. No 4, B with fire), show the PIXE-analysis of the collected particles using the cascade impactor. The figure shows the relative distribution versus aerodynamic particle diameter and only the elements with a total mass larger than 0.2% of analyzed mass. In all cases all elements analyzed have similar distribution and the largest peak at ~ 2 μm. These means that all particle sizes has the equal chemical composition.

The figures also show the relative particle mass distribution measured by the APS. The mass distributions measured using cascade-impactor+PIXE-analysis and APS has both the MMAD about 2 μm, but for larger particles the APS underestimate the mass compared to the cascade-impactor+PIXE-analysis. This is probably caused by the irregular shape of the particles and the APS underestimate the size of irregular particles.

There is also a minor peak for the largest particle size interval. As there were no precollector, the upper particle size limit of deposited particles on this impactor stage is unknown. For B (Figure 5b) this peak is larger and it could be caused by large particles created by the interaction between the aerosol and fire. However, the fraction of particles larger than about 10 μm is small.

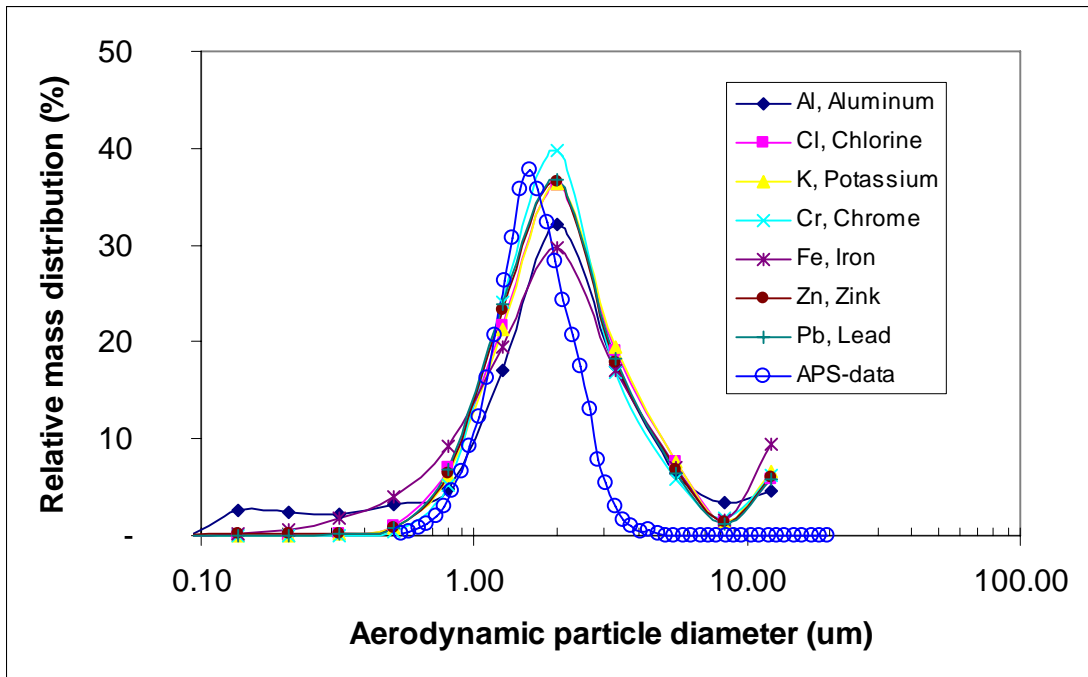


Figure 5a Relative mass distribution (the area of each curve is 100) of A (Exp. No 1) using cascade-impactor + PIXE analysis and APS-data.

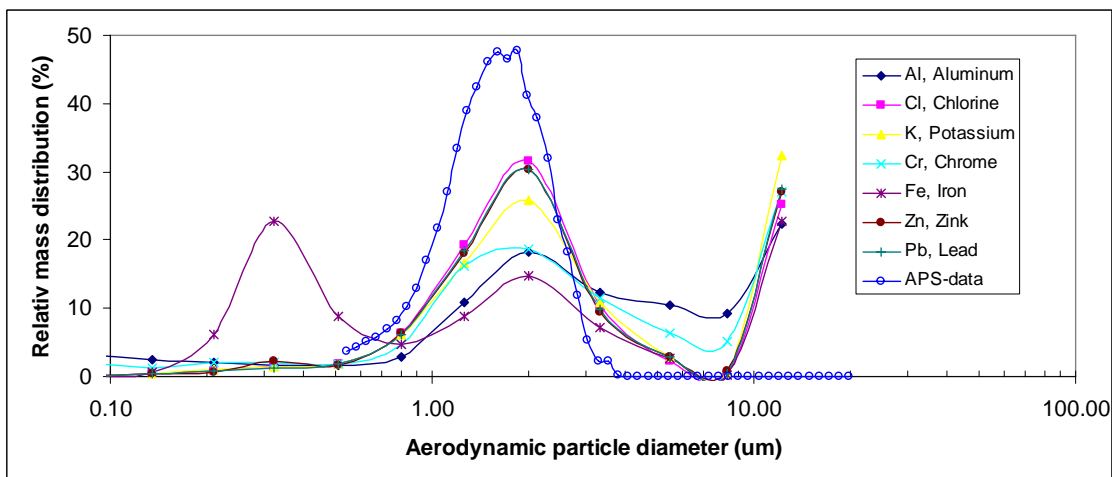


Figure 5b Mass distribution of B with fire (Exp No. 4) using cascade-impactor + PIXE analysis and APS-data.

The entire element analyzed using PIXE from A (Exp. No 1) and B with fire (Exp. No 4) were compared, see Table 4. Table 4 shows the relative composition of the different elements analysed. It is not the concentration values, but for instance K institute 2.8% of the total concentration determined by the manufacture of A. No large difference could be observed between A and B. Largest differences were that A has about 4 times larger concentration of Al and Ti compared to B. The PIXE-analysis was not such sensitive compared to the data given by the manufacture of A. There analysis was performed using Instrumental Neutrons Activation Analysis (INAA). There analyse detect many more elements with low concentrations as: V, Cr, Ni, Se, Br, Rb, Sr, Cd and W. However, the PIXE analyzed some elements that were not detected by INAA as Si and Pb. The high value of Pb using PIXE is remarkable. The PIXE analysis shows also much higher values of Mn and As (95 and 159 times higher than IAA, respectively). The manufacture have compared there measured values for a nominal concentration of 50 mg/m^3 to the Threshold Limit Values (TLV) set by OSHA (Occupational Safety and Health Administration, USA). (It seems that they assume that the air concentration will equal the nominal concentration, but as shown the efficiency is only about 10%). The manufacture concludes that nickel (Ni), barium (Ba) and calcium (Ca) (Notice that PIXE shows much lower values of Ca) exceed the TLV: by factor: 46, 2 and 12, respectively. And tellurium (Te) and vanadium (V) come close. However, the TLV are based on 8 hour exposure each day, in total 1 600 work hour per year. That means i.e. that 8 hour exposures of barium during one year at TLV correspond to 760 hours exposure to PGA at a nominal concentration of 50 g/m^3 .

	A	A	B	Ratio	Ratio
	Pixe analyze	Manufacture	Pixe analyze	A/B	A/Manu
	%	%	%		
Al	0.034	0.002	0.008	4.19	15.5
As	0.006	0.00004	0.014	0.40	159
Ba		0.071			
Br		0.096			
Ca		1.178	0.029		
Cd		0.0004			
Cl	12.045	1.489	19.171	0.63	8.09
Cr		0.005			
Cu		0.046	0.002		
Fe	0.645	0.054	0.882	0.73	12.0
Ga					
Ge					
K	81.308	95.810	71.687	1.13	0.85
Mn	0.034	0.0004	0.061	0.56	94.7
Mo					
Ni		0.328			
P					
Pb	5.704		7.961	0.72	
Pd					
Rb		0.071			
S					
Se		0.0004			
Si	0.004		0.022	0.20	
Sn					
Sr		0.146			
Te		0.007			
Ti	0.005	0.011	0.0011	4.78	0.50
Tl					
V		0.001	0.0002		
W		0.0004			
Y					
Zn	0.215	0.011	0.162	1.32	20.1
Zr					
Sum	100	99.3	100		

Table 4. The entire elements analysed using PIXE from A (Exp. No 1) and B with fire (Exp. No 4). The element analysis performed by the A manufacture is also included. The table shows the relative element composition and given in percentage (%).

In summary, the individual elements regarding the TLV will not be the limiting factor. The total mass concentration will be the limiting factor. As most generated particles are less than 5 µm the total mass (all particle sizes) it is more appropriate to use the term “respirable fraction”, which consist of particles less than 5 µm.

3 Literature study of health effects

There are no human studies performed.

One animal study has been reported in a scientist reviewed journal (??). There is also one pre-study of this, but only reported as a contribution to a conference with unknown review procedure.

Following is a short description of the experiments and the results from the scientific published study. The aim of the study was to examine possible nasal irritation and pulmonary edema formation caused by exposure to SFE-A between 1 h and 14 days post-exposure.

350 Fischer rats (250-300 g) were randomized into five different exposure groups. One control group, not exposed, and four other with different schedule of exposure: two levels of different nominal load (50 and 80 g/m³) and two different exposure time (15 and 60 minutes).

During exposure they were observed at following times: 1, 5, 15, 30, 45 and 60 minutes. After exposure they were placed in fresh air and investigated after following different times: 1 h, 6 h, 24 h, 7 days and 14 days, see Table 4.

Group	SFE load (g/m ³)*	Exposure time (min)	Post-exposure investigation time points (time after exposure)				
			1 h	6 h	24 h	7 days	14 days
1	Control, not exposed	60	14***	14	14	14	14
2	50	15	14	14	14	14	14
3	50	60	14	14	14	14	14
4	80	15	14	14	14	14	14
5	80	60	14	14	14	14	14

* nominal load, 80 g/m³ recommended by the manufacturer

** each group consist of 14 animals that was investigated

Table 4 The design of the clinical study performed by Smith et al (1997).

Clinical observations

For all exposed groups following clinical observations were observed: dyspnea (andningsbesvär), coughing/sneezing. This means that inhalation of SFE for all exposed rates groups were irritating to the mucous membranes of the nasal cavity and respiratory tract. The rats also show cognitive effects as lack of coordination, lethargy (slöhet) and head pulling/straining. Increased exposure the signs became more pronounced. All animals appeared to recover after being placed in fresh air.

No death occurred.

Post mortem (obduktion)

No lesions was noted on the trachea (luftstrupe), lung, heart or abdominal organs (bukorgan). Trace of reddish-brown material was found around the nares (näsöppningar).

Histopathology (vävnadspatologi)

For the most exposed rat group (80g/m³) several different lesions were noted in the nasal region and lung. Also edema (ödem) and pneumonia (lunginflammation) was noted in the lungs. A dose-response relationship was observed. After 7 days post-exposure no effects were observed. That means the effects were reversible.

Dry/wet weight determination

No statistical differences between the groups were observed.

Enzyme analysis

Total protein was elevated in BAL (bronchoalveolar lavage, a fluid deep into the lung that was examined) and a dose-response relationship was observed.

Condensed summary of the discussions of the authors

The study showed a dose-dependent (hydrostatic) pulmonary edema. The edema was reversible, which means resolved (healed) by 7 days post-exposure of fresh air. However, some few animals developed severe (allvarlig) pulmonary (lung) complications. It was discussed in the paper that the rapid dissolution of potassium chloride aerosol would produce a local perturbation (störning) in the electrolyte balance, which in severe (allvarliga) situations hydrostatic edema (ödem=onaturlig vattenansamling i kroppen) can progress to frank (tydlig, klar) alveolar (the part of the lung where gas where the oxygen - carbondioxid change take place) edema.

The MMAD of about 2-3 µm means that the inhaled particles **to a human** being are mostly deposited in the mouth-nose region and deep into the lung, as the alveolar region. The total deposition is about 65%. The deposition fraction is about 30% for each region (mouth-nose and alveolar region, respectively) and the remaining 5% will be deposited in the trachea bronchial region.

4 Summary and discussion

Aerosol measurement

- Our results correspond to other studies and manufactures regarding MMAD and particle mass concentration:
 - The mass median aerodynamic diameter is about 2-3 μm , which means that the generated particles will be effectively deposited in the lungs of a human being, both in the mouth-nasal region as the alveolar region (deepest part of the lung where the gas exchange take place).
 - The actual particle mass concentration is much less than the nominal concentration. The ratio between nominal and obtained initial mass concentration is about 5-10%.
- If no ventilation is used the mass concentration is decreased slowly and the half-time will be about a half hour.
- The mass concentration is extremely high, initial above $\sim 5\,000\text{ mg/m}^3$. Compared to hygienic threshold limit for workplaces, respirable fraction 5 mg/m^3 , the mass concentration of PGA is about 1 000 times higher. A normal work year is 1600 hours, which means that about 1 hour exposure to PGA equals one year exposure at workplace with maximum allowed respirable particle mass concentration of 5 mg/m^3 . This level is only found at extreme pollutant workplaces as pig stables and welding industries, where protection masks normally are used. TLV for workplaces take into consideration that the exposure happens in controlled environment to healthy adults in the age-group 20 to 65. If PGA should be used in public environments the comparison should been performed regarding the legislation for the outdoor air, which all people are exposed to. The yearly average mass concentration measured as PM10 (particles less than $10\ \mu\text{m}$) for outdoors is by EU regulated to 0.04 mg/m^3 . This level is about 100 times lower than the respirable fraction of TLV for workplaces. One hour exposure of PGA correspond to about 60 years exposure to the outdoor PM10 standard. The last 10-20 years it has been established that airborne particles increase the mortality, and the EU standard of 0.04 mg/m^3 is based on that knowledge.
- Is it possible to enter a room where PGA has been used? Assuming that the initial is about $5\,000\text{ mg/m}^3$, the TLV should be exceeded within 30 seconds of exposure if no safety equipment is used. If no ventilation is used to evacuate the PGA the concentration will be halved in about 30 minutes. If longer exposure time is required and without exceeding the TLV value, it will be necessary to delay the entrance. If the entrance is delayed to X times 30 minutes, the exposure time could be prolonged to 2^X times 30 seconds, without exceeding the TLV. For instance if the entrance is prolonged to 2 hours ($X = 4$), the maximum exposure time will 8 minutes (2^4 times 30 seconds = 480 seconds = 8 minutes) and the mass concentration will be about 300 mg/m^3 . It should also be noted that the visibility at the initial concentration $5\,000\text{ mg/m}^3$ is inappreciable, but maybe sufficient at 300 mg/m^3 .

Please note, this is just an example based on limited data and based on a small volume. For more realistic rooms more experimental is needed and new modelling is needed. The example shows the main principle.

- The individual elements, analyst using PIXE and/or INNA, regarding the TLV will not be the limiting factor.

Human exposure to PGA

- The clinical observation of the PGA exposed rats shows that the exposure to 15 minutes (nominal concentration 50g/m^3) cause acute health effects as irritation of the mucous membranes of the nasal cavity and respiratory tract as cognitive effects. These effects were reversible (which means resolved (healed) by 7 days post-exposure of fresh air). It is likely that human being will have the same clinical effects:
 - The human lung and nasal cavity will be strongly irritated with effects as sneezing, coughing etc, and they will be reversible.
 - Cognitive effects as coordination and concentration should be considered.
- Histopathology and enzyme analysis shows a dose-dependent (hydrostatic) pulmonary edema. The edema was reversible. However, some few animals developed severe (allvarlig) pulmonary (lung) complications. A hypothesis was described how more severe alveolar edema could be developed. Considering this it could be argued that adverse long-term effects to human being exposed to PGA could not be excluded.
- The solubility of the particles is of large importance when considering the health effects of PGA. In general is argued that soluble particles are less harmful as they will be dissolved in the lung, which help the clearance (rengöring). Especially insoluble particles deposited in the alveolar region are considered as the most harmful particles. It is assumed in the literature that PGA particles are soluble, but no references are given. However, in this case the enormous deposition of soluble particles in the lung should be considered as it possible that the chemical composition in the lung as well as the clearance function could be changed in a harmful way. These means that the often used argument that the solubility of the PGA particles support non-toxicity is not obviously.

5 CONCLUSIONS

Using PGA will give rise to very high particle mass concentration and the particle sizes of PGA cause efficient particle deposition to both the nasal region and the alveolar region of the lung. Even short time of exposure, in the range of 10 minutes, will be comparably to one year of exposure to maximum permitted concentrations in workplaces. Workplaces with maximum permitted concentrations cause often that safety equipment will be used.

It is recommended that PGA system should not be used in locals where people could be exposed to PGA. This recommendation is based on following:

- People that by accident will be exposed to PGA will be forced to a large dose to the respiratory tract even if the exposure time is in the range of minutes. It should also be noted that the low visibility and acute health effects will aggravate both self-help and rescues actions.
- Clinical studies of rats exposed to PGA shows dose-dependent pulmonary edema. This was found for expected exposure levels in locals supplied with PGA systems.
- No studies have been performed to human being exposed to PGA of these large particle mass concentrations.

References

Ekström J. and Nilsson B. (2008) Pyrotekniskt genererade aerosoler

- experimentella studier med avseende på funktion och risker rörande människa och teknik. Examensarbete. Lunds tekniska högskola, Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lund Tekniska Högskola.

Kimmel E.C, Smith E.A., Reboulet J.E., Black B.H., Sheinson R.S., and Carpenter R.L. (1995) Physical and chemical characteristics of SFE fire suppressant atmospheres. Comparison of small with large laboratory atmospheres. *Contribution to conference, HOTWC 1995 (Halon Options Technical Working Conference, www.bfrl.nist.gov/866/HOTWC)*

Smith E.A, Kimmel E.C., English J.H., Bowen L.E., Reboulet J.E. and Carpenter R.L. (1997). Evaluation of the respiratory tract after acute exposure to a pyrotechnically generated aerosol fire suppressant. *Journal of applied toxicology* 17:95-103.

APPENDIX A

$$Q_{eq} = v_{sed} * A$$

where A is the bottom surface area of the box and v_{sed} is the sedimentation velocity of an airborne particles calculated as:

$$v_{sed} = \frac{g\rho_0 d_{ae}}{18\eta}$$

where g (gravity constant) = 9.81 m/s, ρ_0 (unit density) = 1000 kg/m³, η (air viscosity) = 1.81 10⁻⁵ Ns/m².

The concentration versus time (t) in a ventilated box is expressed by:

$$C(t) = C_0 e^{-nt}$$

Where n is the specific ventilation rate (s⁻¹) and expressed as:

$$n = \frac{Q_{eq}}{V}$$

Where V is the volume of the box (m³).