

Fyrverkeripjäser som antändning vid bränder

Lars-Gunnar Klason, Nils Johansson
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP Rapport 2011:05
Borås, 2011



Abstract

Fireworks have been identified as a rather common ignition source in arson fires. Thus, a series of experiments with various sizes of fireworks was conducted in order to determine what could be ignited by fireworks and to compare the heat flux from a specific piece of fireworks with those fluxes used for classifying building material. The fireworks used in the study were rather small in size so that it would be possible to send them into a building through e.g. a mail box.

The experiments have focused on evaluation of the thrust of the fireworks as the metal salts and pieces that are emitted as projectiles from the fireworks will most definitely be able to ignite many materials and it is not easy to capture these in an experimental set-up and conduct measurements on them. The experiments resulted in a HRR of 20-100 kW and an incident radiation of 20-105 kW/m² on a copper plate placed 27 cm underneath the firework's thrust. If one looks at the radiation closer to the thrust then we end up with values of the order of 1 MW/m², i.e. a very high incident radiation. This radiation should be compared to the radiation levels used in the Cone Calorimeter ISO 5660 test (35, 50 or up to 100 kW/m²) and the EN 13823-SBI test (40 kW/m²).

In ISO 5660 the surface of the test specimen is exposed to a constant level of heat irradiance, within the range 0-100 kW/m², from a conical heater. The standard is set to 50 kW/m². Comparative tests performed in a Cone Calorimeter by Babrauskas suggest that upholstered furniture, wooden material and particle boards may be ignited when a firework is positioned about 27 cm from these materials.

In EN 13823-SBI the test specimen is exposed to a gas burner with a heat release rate of 30 kW resulting in a maximum heat exposure of about 40 kW/m² on an area of approximately 300 cm². The flame height of the gas burner is approximately 50 cm. For flammable materials there will be a gradual spread of the flame that leads to classification according to Euro Class B, C, D, and E. It is likely that materials with the classification Euro Class C or worse can ignite and possibly spread a fire when exposed to thrust from fireworks at a distance of approximately 27 cm. However, it should be noted that the test time in EN 13823-SBI is considerably longer than the test time of fireworks, which complicates the comparison.

Key words: Fireworks, heat flux, ignition, arson, school fires, cone calorimeter

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2011:05
ISBN 978-91-86622-34-3
ISSN 0284-5172
Borås 2011

Sammanfattning

Fyrverkerier har identifierats som en vanligt förekommande tändkälla vid anlagda bränder. En serie experiment med fyrverkeripjäser av olika storlek har utförts för att avgöra vilka material en fyrverkeripjäs kan antända och för att jämföra den strålningspåverkan som en pjäs utgör jämfört med de strålningsnivåer som normalt används när man klassificerar byggnadsmaterial. De fyrverkerier som användes i studien var ganska små i storlek så att det skulle vara möjligt att skicka dem genom t.ex. en brevlåda.

Försöken har fokuserat på fyrverkeripjäsens drivningsdel. De metallsalter och stycken som kastas ut från fyrverkeripjäsen kan definitivt antända många olika material, men dessa kringflygande delar är svåra att fånga in vid ett experiment. Experimenten resulterade i en HRR av 20-100 kW och en infallande strålning av 20-105 kW/m² på en kopparplåt som placerats 27 cm under fyrverkeripjäsens drivningsdel. På kortare avstånd fås en strålning och värmepåverkan på upp till storleksordningen 1 MW/m², d.v.s. en mycket hög infallande strålning. Som en jämförelse kan nämnas de strålningsnivåer som används i konkalorimetern ISO 5660 är 50 alternativt 35 kW/m² och i EN 13823-SBI 40 kW/m².

I ISO 5660 utsätts en provkropp med dimension 100 mm x 100 mm för en bestämd strålningsnivå mellan 0-100 kW/m² där en standard av 50 kW/m² ges. En litteraturstudie med jämförande tester gjorda i konkalorimeter tyder på att t.ex. soffor och trä kan antändas då fyrverkeripjäsen befinner sig ca. 27 cm från dessa material.

I EN 13823-SBI exponeras provmaterialet för en brännareffekt på 30 kW vilket resulterar i en strålning på 40 kW/m² på en yta av ungefär 300 cm². Brännarens flamhöjd är ungefär 50 cm. För brännbara material sker då en successiv flamspridning som leder till en klassning i någon av klasserna B, C, D eller E. Det är troligt att material med klassificeringen Euroklass C, D och E kan antändas och eventuellt sprida brand då de, på ett avstånd av ca. 27 cm, utsätts för en fyrverkeripjäs. Dock bör påpekas att EN 13823-SBI olik fyrverkeripjäsens flamma är av typen diffusionsflamma samt att provningen i EN 13823-SBI pågår betydligt längre än den tid en fyrverkeripjäs kan utsätta ett material för värmestrålning, något som försvårar jämförelsen.

Innehållsförteckning

Abstract	2
Sammanfattning	3
Innehållsförteckning	4
Förord	5
Nomenklatur	6
1 Inledning	7
2 Fyrverkeripjäser	7
3 Försöksuppställning	8
4 Resultat	11
4.1 Resultatjämförelser mellan identiska försök	22
4.2 Variation mellan olika fyrverkeripjäser	25
5 Antändningsförmåga	26
5.1 Uppvärmning av material	26
5.1.1 Termiskt tunna material	27
5.1.2 Halvoändliga material	28
5.2 Uppskattning av totala värmestrålningen till kopparplattan	28
5.2.1 Uppskattning av värmestrålning från fyrverkeripjäsernas drivning	28
5.2.2 Konvektionsförluster	29
5.2.3 Strålningsförluster	30
5.2.4 Total strålning till kopparplattan	30
5.2.5 Värmestrålning från fyrverkeripjäserna	31
5.2.6 HRR från fyrverkeripjäserna	31
5.3 Antändning	32
5.3.1 Antändning av termiskt tunna material	32
5.3.2 Antändning av halvoändliga material	33
5.4 Jämförelse med Konkalorimetern ISO 5660	33
5.5 Jämförelse med Single Burning Item 13823-SBI	34
6 Diskussion	35
7 Slutsatser	36
8 Referenser	38
Bilaga 1, Bilder från försöken	39

Förord

Brandforsk inledde 2007 en satsning på forskning angående anlagd brand. Det resulterande forskningsprogrammet har som målsättning att ta ett samlat grepp kring anlagd brand. Fokus är på anlagda bränder i skolor och förskolor men även andra byggnader och anläggningar kommer att beaktas. Målsättningen och förhoppningen är att resultaten av projektet ska leda till färre anlagda bränder med mindre konsekvenser för samhället.

Forskningen som presenteras i denna rapport har bedrivits som en del i Brandforsks särskilda satsning anlagd brand. Till projektet och delprojekten i Brandforsks särskilda satsning inom Anlagd Brand är såväl en styrgrupp, med representanter från finansiärerna, som en gemensam referensgrupp knuten.

Satsningen finansieras förutom av Brandforsk också av:

Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB)
Malmö Stad
Svenska Kommun Försäkrings AB
Kommunassurans Syd
Länsförsäkringar
Trygg-Hansa
Göta Lejon
St Eriks försäkring
Stockholmsregionens Försäkrings AB
Förenade Småkommuners Försäkringsbolag
KommuneForsikring

Vilket tacksamt erkännes.

Vi vill också tacka Petra Andersson och Margaret Simonson McNamee vid SP Brandteknik samt Patrick van Hees vid Lunds Tekniska Högskola för deras värdefulla synpunkter på rapporten.

Nomenklatur

A	area, [m ²]
c_p	specifik värmekapacitet, [kJ/kgK]
d	tjocklek, [m]
F_{ij}	synfaktor, [-]
h	konvektiva värmeövergångstalet, [W/m ² K]
HRR	värmeutveckling eng. Heat Release Rate, [W]
L	tjocklek, [m]
$k\rho c$	termisk tröghet, [W ² s/m ⁴ K ²]
m	massa, [kg]
\dot{q}_e''	infallande strålning, [W/m ²]
\dot{q}_{konv}''	konvektionsförluster, [W/m ²]
\dot{q}_r''	strålningsförluster, [W/m ²]
$\dot{q}_{fyrverkereri}''$	värmestrålning från fyrverkeripjäsa, [W/m ²]
t	tid, [s]
t_{ig}	antändningstid, [s]
T	temperatur, [°C, K]
T_{amb}	omgivande lufttemperatur, [°C, K]
T_{ig}	antändningstemperatur, [°C, K]
T_s	ytemperatur, [°C, K]
ΔT	temperaturskillnad, [°C, K]
x	avstånd, [m]

Grekiska Symboler

α	värmediffusivitet, [m ² /s]
ξ	absorptivitet, [-]
ϵ	emissivitet, [-]
ρ	densitet, [kg/m ³]
σ	Stefan Boltzmanns konstant, [5.67 x 10 ⁻⁸ Wm ⁻² K ⁻⁴]

1 Inledning

Av ”Brandstatistik – Vad vet vi om anlagda bränder”¹ samt ”Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagda brand i skolor”² framgår det att fyrverkeripjäser är en av de antändningskällor som vid upprepade tillfällen startat kostsamma bränder, speciellt inomhus. Även om det totala antalet bränder av fyrverkeripjäser i skolbyggnader som rapporterats från Räddningstjänstens insatsrapporter är relativt lågt så har andelen skolbränder där fyrverkerier anges som brandorsak ökat markant från 2001 till 2007¹. Kostnaderna för dessa bränder har vid ett flertal tillfällen varit mycket höga, t.ex. i Dalsjöfors 2008 där en förskola totalförstördes och i en skolbyggnad i Lund 2009 där skadorna uppskattades till ca 70 miljoner^{1, 2}.

Litteraturen innehåller dock väldigt begränsad information om fyrverkeripjäasers förmåga att antända olika material³. Denna information är viktig för att bättre kunna utreda hur man kan skydda sig mot denna typen av anlagda bränder. Denna rapport redovisar resultaten från några experiment där temperatur har mätts på ett antal punkter kring några olika fyrverkeripjäser för att på så sätt kunna uppskatta den värmepåverkan pjäsen ger på omkringliggande föremål och material. Vidare görs en uppskattning av vilka föremål/material pjäserna kan antända.

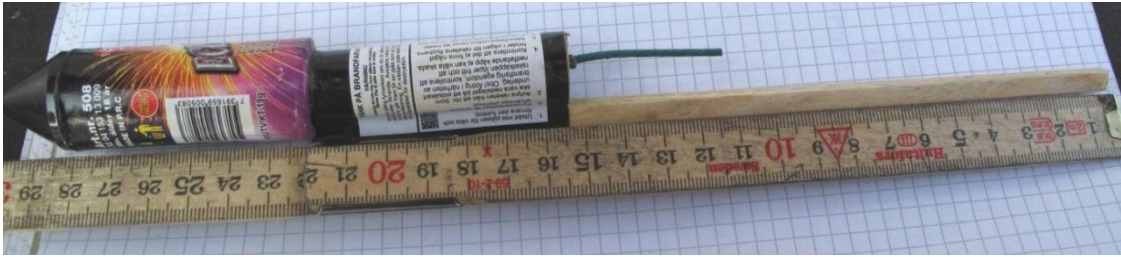
Tänkbara scenarier vid antändning med fyrverkeripjäser är att pjäsen skickas in genom brevlådan, ventilationen eller ett krossat fönster. Pjäsen kan då antingen flyga runt i rummet och antända flera föremål t.ex. gardiner eller så kan den fastna i t.ex. ett hörn och därigenom ge en avsevärd lokal värmepåverkan. För studien valdes några ganska små pjäser som är förhållandevis lätta att få in genom en mindre öppning i rummet/byggnaden, t.ex. ett brevinkast.

2 Fyrverkeripjäser

Fyrverkeripjäser kan delas upp i två olika typer: professionella fyrverkeripjäser och fyrverkeripjäser för privat konsumtion. Fyrverkeripjäserna kan delas in i bomber, eldbägare, romljus och fyrverkeritårter. Detta projekt fokuserar på raketer för privat konsumtion. Vanliga fyrverkeripjäser för privat konsumtion består i regel av två olika delar: en drivningsdel och en del som ger dess färgspektra. Drivhylsan består av tjockväggigt papper med en pressad svartkrutkärna (antingen i ren form eller i blandning med andra ämnen). Svartkrutet antänds och expansionen av de varma gaserna skapar en tryckkraft, något som driver fyrverkeripjäsen framåt^{4, 5}.

Ovanför drivhylsan ligger olika metaller och metallsalter vilket ger fyrverkeripjäsen dess färgspektra. Färgspektret skapas genom att metallerna och metallsalterna via förbränning omvandlas till metalloxider. Olika metaller ger olika färger. De vanligaste förekommande metallerna är aluminium, antimon, barium, bly, järn, kalium, magnesium, natrium, strontium, titan och vismut⁶.

För val av fyrverkeripjäser användes två urvalskriterier: raketerna skall vara tillräckligt liten för att kunna passera genom en större brevlåda eller ventilationsöppning men samtidigt vara tillräckligt stor för att utgöra en antändningsrisk. Under försökens gång användes fyra olika raketer från Hammargren Pyroteknik AB (i ordningen storleksmässigt minst till störst); Eclipse, Apollo, MegaTwin och Nova, se Figur 1 till Figur 4.



Figur 1 Eclipse



Figur 2 Apollo



Figur 3 MegaTwin



Figur 4 Nova

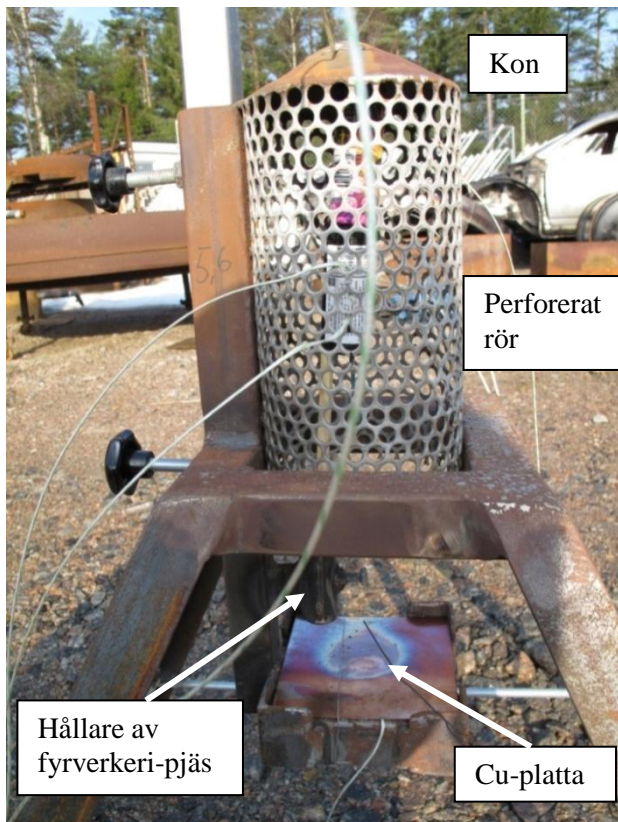
3 Försöksuppställning

Vanligtvis mäts effektutvecklingen, HRR, genom att placera ett testföremål under en huv och mäta syreförbrukningen under testets gång⁷. De flesta ämnen avger en effekt på ungefär 13100 kJ/kg förbrukat syre vilket innebär att HRR kan beräknas med kännedom om syreförbrukningen⁷. Fyrverkeripjäser innehåller dock syre vilket introducerar ett fel vid mätning med syrgaskonsumtion. Dessutom är förloppet för en fyrverkeripjäs snabbt i förhållande till de material man oftast mäter på m.h.a. syrgasförbrukning vilket introducerar ytterligare osäkerheter. Därför beräknades den värmepåverkan en fyrverkeripjäs utsätter en provkropp för, ca 27 cm från fyrverkeripjäsens drivningsdel, genom att mäta temperaturen på ett antal punkter kring pjäsen. Ett annat skäl till denna mätmetod är att försöken då kunde genomföras utomhus vilket är en fördel ur ljud- och säkerhetssynpunkt.

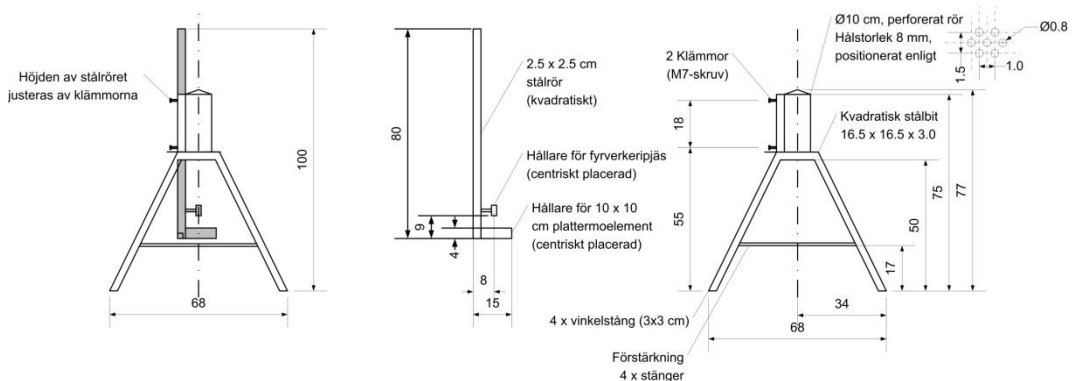
En testrigg byggdes som ses i Figur 5 och dess dimensioner i Figur 6. Riggen består av ett vertikalt perforerat rör vilket är slutet i ena änden. Den slutna änden är konisk för att leda raketerna och därmed minska risken att raketerna åker omkring inuti riggen under experimentet. Riggen perforerades för att motverka den tryckuppyggnad som annars

skulle uppstått av raketerna och kunnat skada riggen. Riggen består även av två stycken hållare varav den ena håller upp den 0,2 mm tjocka kopparplattan på vilken ett termoelement är påsvetsat. Den andra hållaren fixerades på ett avstånd av ca 5 cm ovanför kopparplattan och i denna placerades raketens styrpinne och fixerades m.h.a. en skruv. Riggen förseddes med åtta stycken termoelement; se Tabell 1 och Figur 7.

Den viktigaste mätpunkten var plattermoelementet⁸ som placerades i hållaren under drivraketen och som ger en uppfattning om värmen ifrån drivraketen. Eftersom vi förväntade oss ett snabbt förlopp valdes inte en traditionell utformning av ett plattermoelement⁸ (0.7 mm tjockt av Inconel 600 rostfritt stål) utan ett element tillverkades av en 0,2 mm tjock kopparplåt, 10 x 10 cm. Övriga termoelement placerades ut på riggen för att mäta en eventuell temperaturökning på riggen, chansen var dock liten att dessa skulle träffas av någon fyrverkeridel. Mätning skedde med en datalogger, IMP nr 1. Totalt gjordes 10 provningar och varje provning varade i ungefär 200 sekunder. Mätvärden togs tre gånger per sekund.



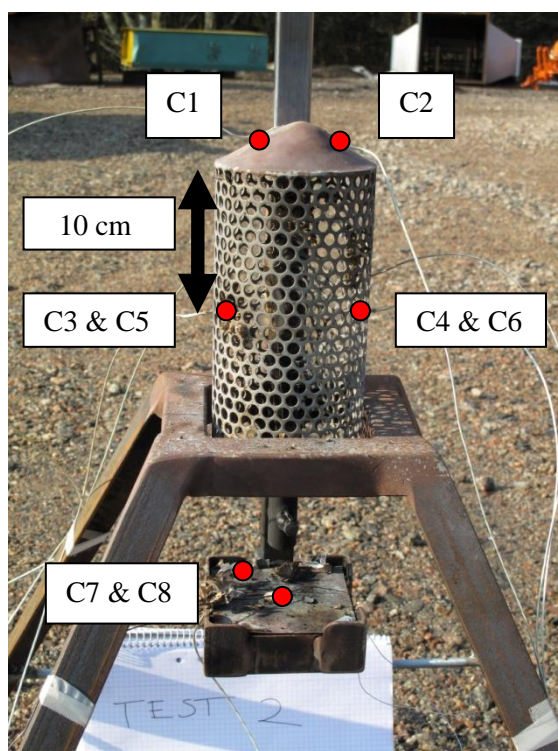
Figur 5 Testrigg



Figur 6 Ritning av testrigg

Tabell 1 Placering av termoelement

Nummer	Typ	Placering
C1	Termoelement	Svetsad på utsidan av konen
C2	Termoelement	Svetsad på utsidan av konen
C3	Termoelement	Svetsad på utsida av perforerat rör, 10 cm från kon (se Figur 7)
C4	Termoelement	Fritt hängande i luften, samma position som C3
C5	Termoelement	Svetsad på utsida av perforerat rör. Samma position som C3 men motsatt sida
C6	Termoelement	Fritt hängande i luften, samma position som C3 men motsatt sida
C7	Termoelement svetsat på 0.2 mm tjock kopparplatta (plattermoelement)	Hållare, placerad under raketten.
C8	Mantlat termoelement 0.5 mm	Placerad ca 1-3 cm ovanför kopparplattan.



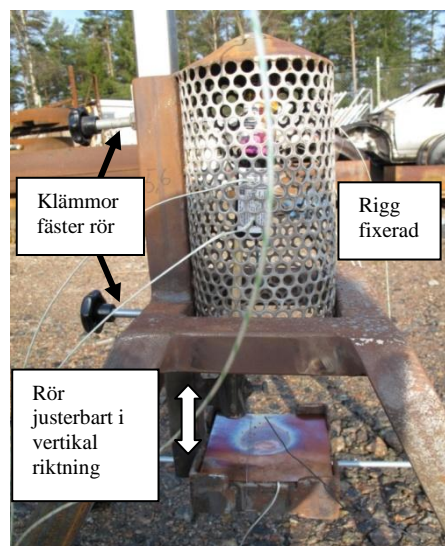
Figur 7 Placering av termoelement, ungefärlig placering ses som röda punkter

För att testa riggens stabilitet och för att få en ungefärlig storlek av drivningsdelens flamma genomfördes ett inledande test utan termoelement. Försöket studerades via videofilm och därefter bestämdes avståndet mellan kopparplattan och raketens drivningsdel till ca 27 cm, vilket korrelerade med mittpunkten av drivningsdelens flamma. Detta avstånd kan, ur ett anlagd brand perspektiv, anses vara relativt normalt i de fall där fyrverkeripjäsa fastnar t.ex. i ett hörn och utsätter material för ett värmefflöde. Detta avstånd uppnåddes i testen genom att kapa fyrverkeripjäsaens pinne till ett avstånd av 22 cm från explosionsdelen, se Figur 1, då avståndet från dess hållare till kopparplattan var ca 5 cm.

Vid varje test kapades fyrverkeripjäsaens pinne till önskad längd och placerades i dess hållare, därefter fördes raketten upp i vertikal riktning mot den koniska toppen på riggen.

Då toppen på fyrverkeripjäsen var centrerad och nuddade konens insida låstes positionen fast genom att vrida på ”klämmorna” som ses i Figur 8.

Under testserien med Eclipse användes två olika kopparplattor för fyrverkeripjäsen Eclipse; en belagd med svart färg (emissivitet antas vara lika med 1) och en utan beläggning (emissivitet för koppar med ett oxidlager är 0.78 och 0.02 utan oxid⁹). Övriga tester använde endast kopparplatta belagd med svart färg. Samtliga försök videofilmades. Vid försöken startades mätning 1 minut före antändning och videon startades 30 sekunder före antändning. Bilder från mätningarna kan ses i Bilaga 1, Bilder från försöken.



Figur 8 Skiss över hur riggen regleras i höjddled

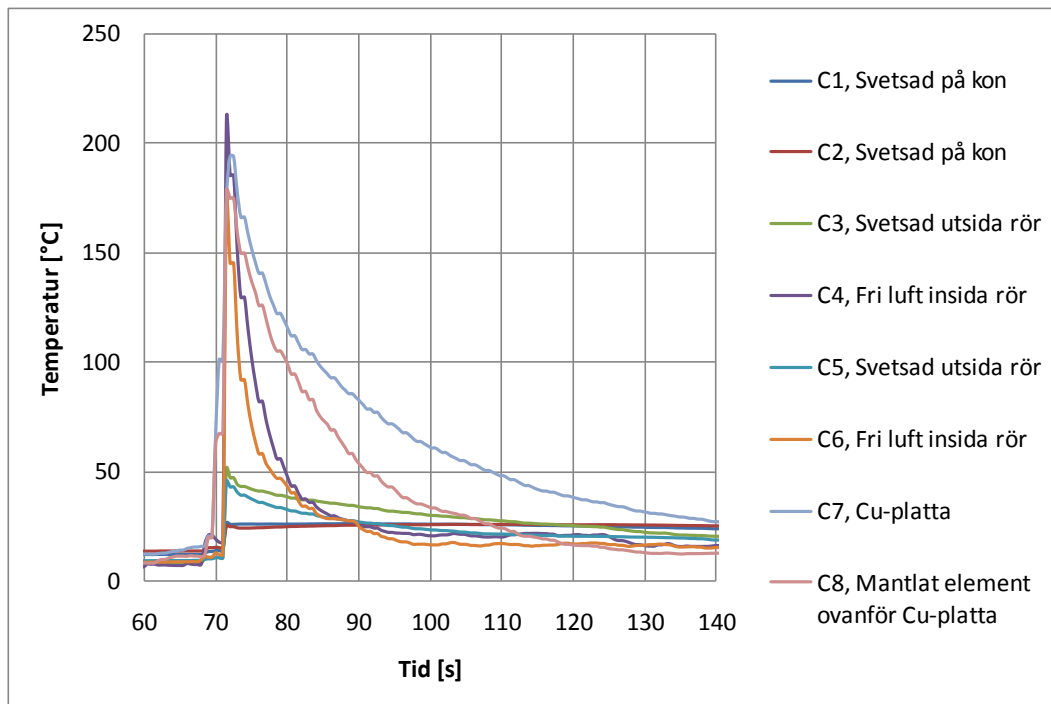
4 Resultat

Totalt genomfördes 10 försök vilka listas i Tabell 2. Mätresultaten presenteras i Figur 9- Figur 18.

Tabell 2 Lista över de olika testerna och kommentarer av testerna

Test	Fyrverkeripjäs	Kommentar
1	Eclipse	Test av den minsta fyrverkeripjäsen
2	Eclipse	Repetition av test 1. Ca 5 s sen med att starta tidtagaruret
3	Eclipse	Repetition av test 1 och 2 men plattermoelementet var svartmålad för att få en känd emissivitet
4	Apollo	Fyrverkeripjäsen Apollo är något större än Eclipse
5	Apollo	Repetition av test 4 men mätintervallet ändrades till 0.3 s
6	MegaTwin	Fyrverkeripjäsen MegaTwin är större än Apollo och har två explosionsdelar
7	MegaTwin	Repetition av test 6
8	Nova	Nova är den största av de testade fyrverkeripjäserna
9	Nova	Repetition av test 8
10	MegaTwin	Repetition av test 6 och 7, dock var styrpinnen kortare

Test 1 - Eclipse



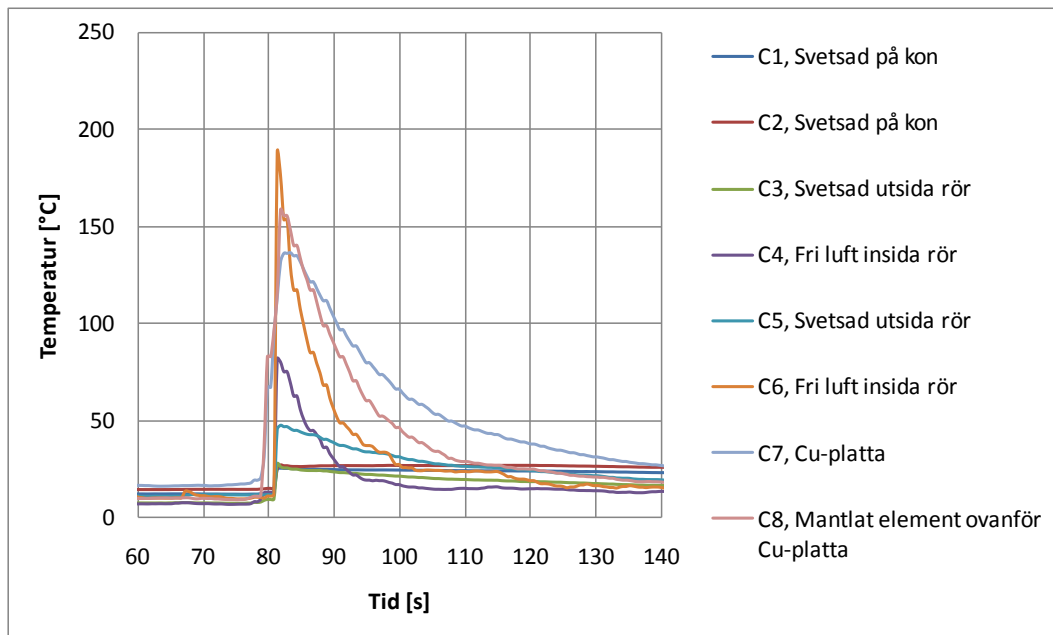
Figur 9 Eclipse, test 1

Tabell 3 Maximal temperatur för Eclipse, test 1

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
26 respektive 27	46 respektive 52	172 respektive 211	179	194

Tid från användning till explosion bedömdes genom video till ca 10 sekunder. Den kraftiga temperaturstegringen skedde de tre sista sekunderna innan explosionen då de varma drivningsgaserna träffade kopparkplattan (sågs på video).

Test 2 - Eclipse



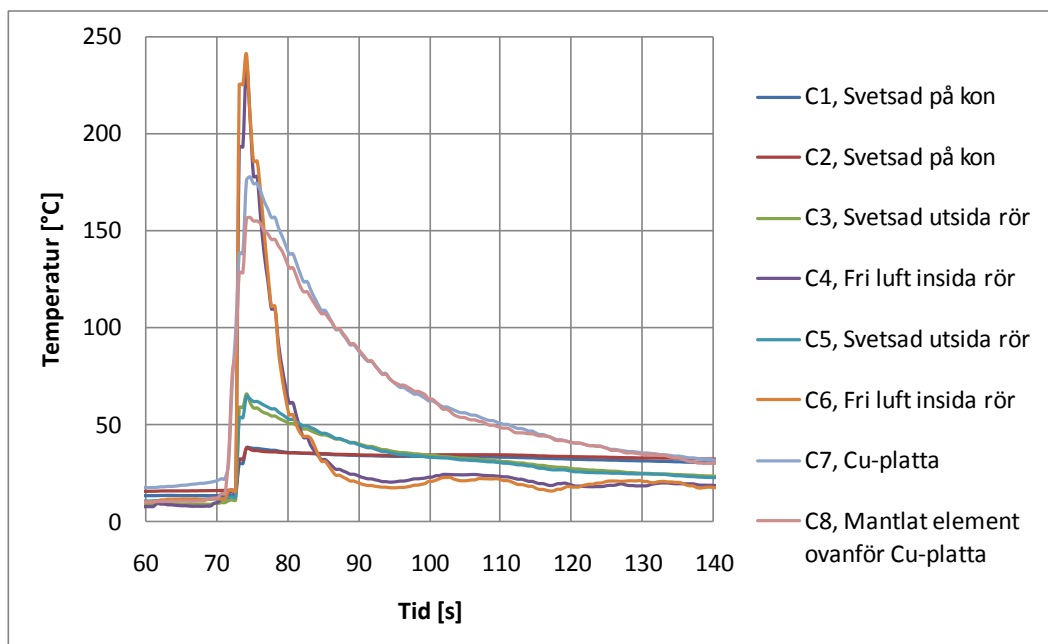
Figur 10 Eclipse test 2

Tabell 4 Maximal temperatur för Eclipse, test 2

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparplatta °C	Cu-platta °C
25 respektive 27	28 respektive 48	82 respektive 188	159	137

Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilmen till ca 10 sekunder. Den kraftiga temperaturstegringen skedde under de sista fyra sekunderna innan explosionen vilket korrelerade med tidpunkten då de varma drivningsgaserna träffade kopparplattan (bedömdes visuellt på videofilmen). Det ena av de två fritt hängande termoelementen uppvisade högst temperatur vilket troligtvis berodde på att detta träffats under explosionen. Test 2 uppvisade överlag lägre temperaturer än test 1.

Test 3 - Eclipse



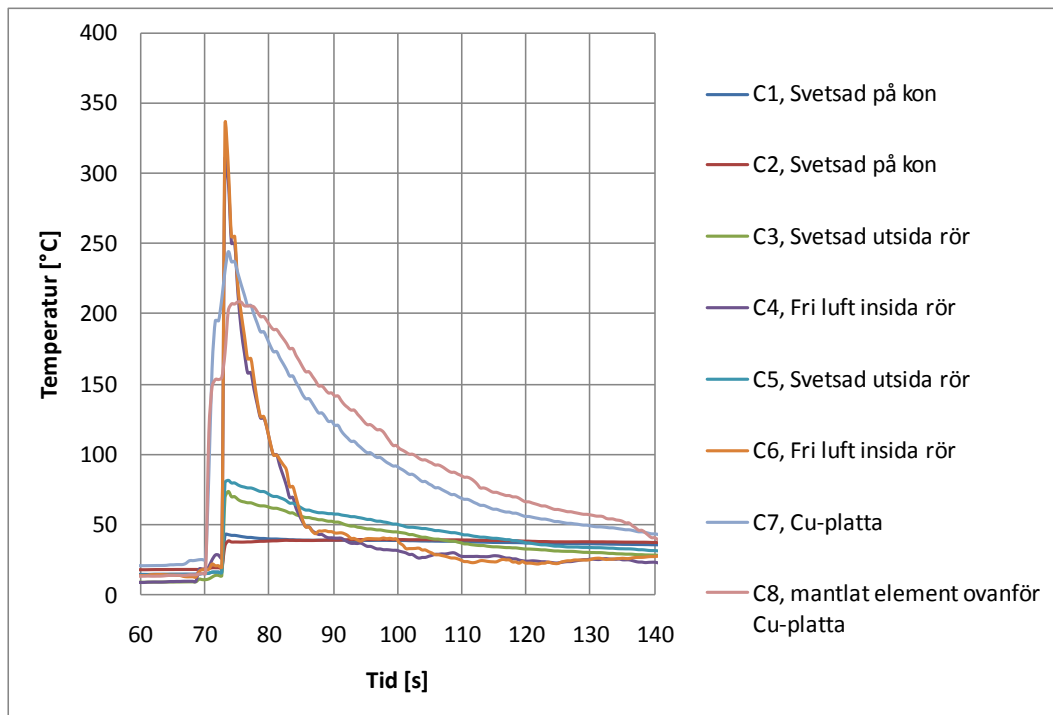
Figur 11 Eclipse, test 3

Tabell 5 Maximal temperatur för Eclipse, test 3

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
38 respektive 38	65 respektive 65	235 respektive 241	157	178

Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilmen till ca 12 sekunder. Den kraftiga temperaturökningen skedde de sista 3 sekunderna innan explosionen (något som sågs via video), vilket sammanföll med det tidsspann då de varma drivningsgaserna träffade kopparkplattan. Återigen uppvisade de fritt hängande termoelementen högst temperatur. Under samtliga tester blev det nästintill ingenting kvar, förutom styrpinnen, av fyrverkeripjäsen Eclipse. Under test 3 var kopparkplattan svartmålad, dock utan att nämnvärt påverka uppmätt temperatur på kopparkplattan. Test 3 uppvisade lägre temperatur jämfört med test 1, men högre temperatur jämfört med test 2.

Test 4 - Apollo



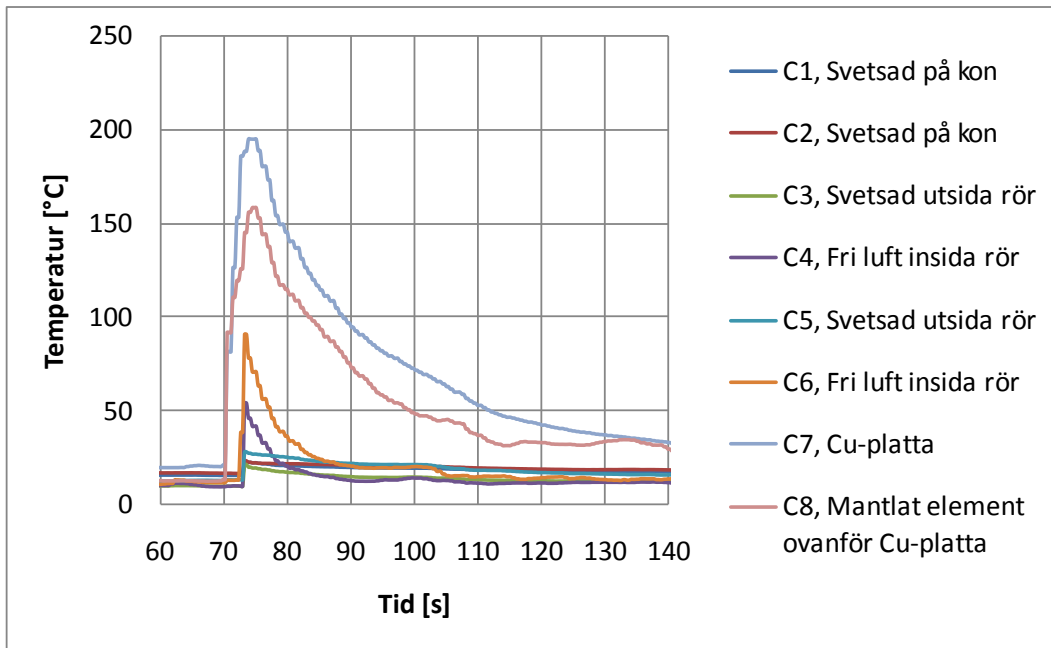
Figur 12 Apollo, test 4

Tabell 6 Maximal temperatur för Apollo, test 4

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
39 respektive 43	74 respektive 81	310 respektive 334	209	244

Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilmen till ca 11 sekunder. Temperaturstegringen skedde främst de sista fem sekunderna innan explosion.

Test 5 - Apollo



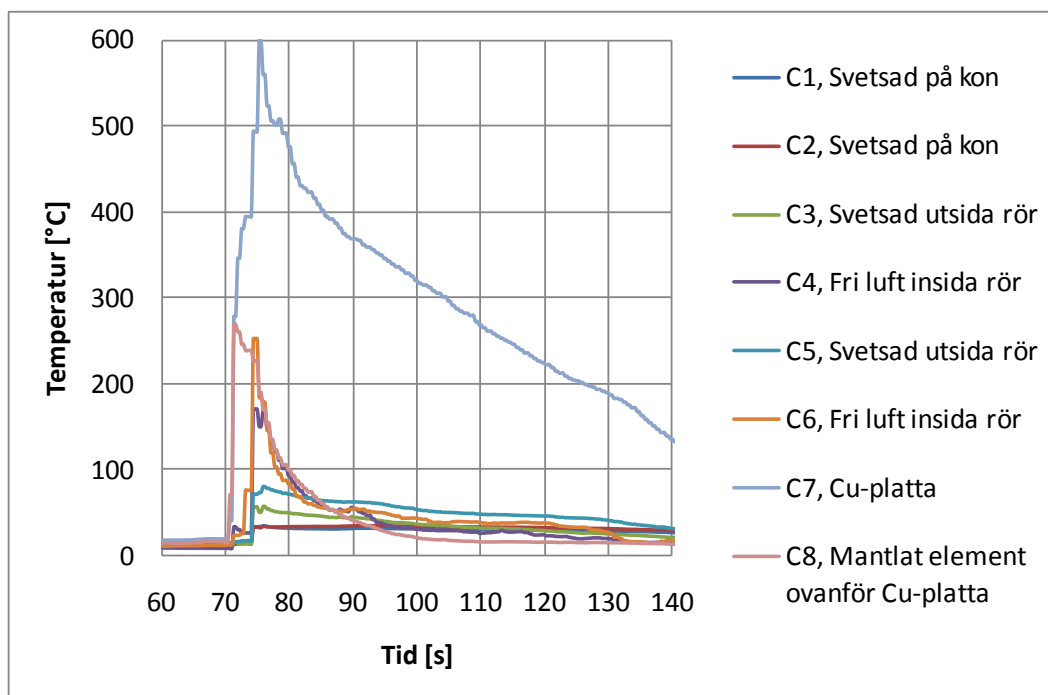
Figur 13 Apollo, test 5

Tabell 7 Maximal temperatur för Apollo, test 5

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparsplatta °C	Cu-platta °C
22 respektive 23	21 respektive 28	54 respektive 91	159	195

Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilmen till ca 11 sekunder. Testet uppvisade lägre temperaturer än test 4. På videon blåste röken direkt mot kameran vilket försämrade visuella bedömningar. Temperaturstegringen skedde främst de sista fyra sekunderna innan explosion (visuell bedömning av video).

Test 6 - MegaTwin



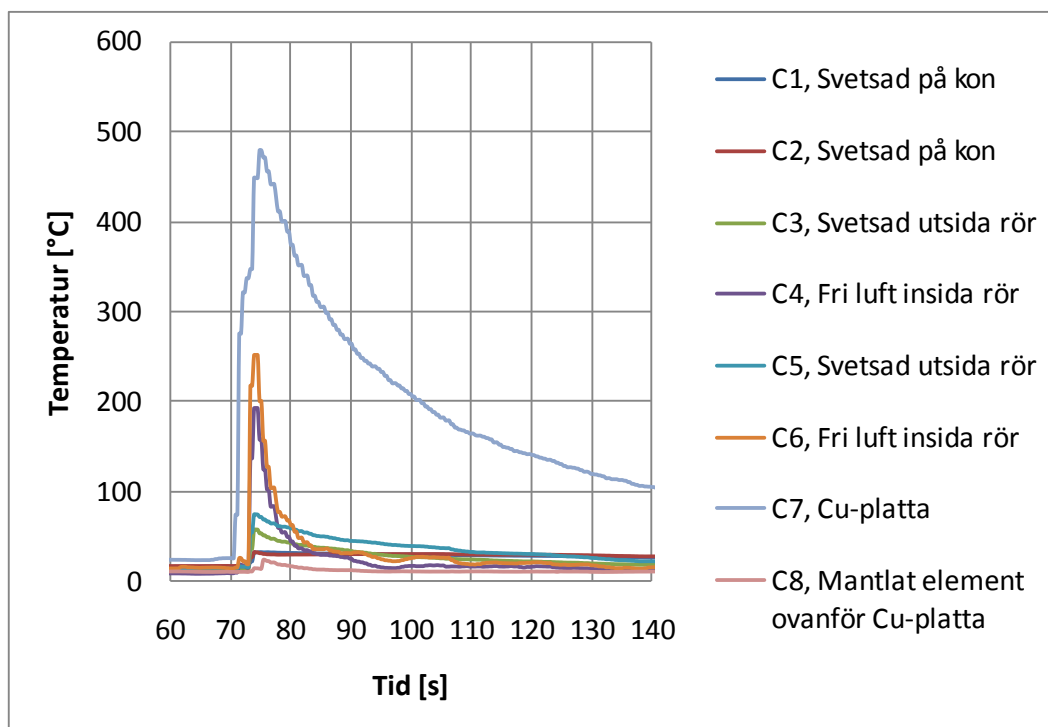
Figur 14 MegaTwin, test 6

Tabell 8 Maximal temperatur för MegaTwin, test 6

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
34 respektive 35	58 respektive 81	170 respektive 251	269	599

MegaTwin skiljde sig gentemot övriga fyrverkeripjäser då den bestod av två olika explosioner. Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilmen till ca 12 sekunder och tid till explosion två var ca 14 sekunder (två sekunder efter första explosionen). Efter första explosionen föll rester av fyrverkeripjäsen ner på kopparkplattan där den andra explosionen ägde rum, något som sågs på videon. På video sågs att rester av fyrverkeripjäsen (papper och metaller/metallsalter) brann upp på kopparkplattan, vilket gör att denna uppvisade högre temperaturer över en längre tid jämfört med övriga termoelement.

Test 7 - MegaTwin



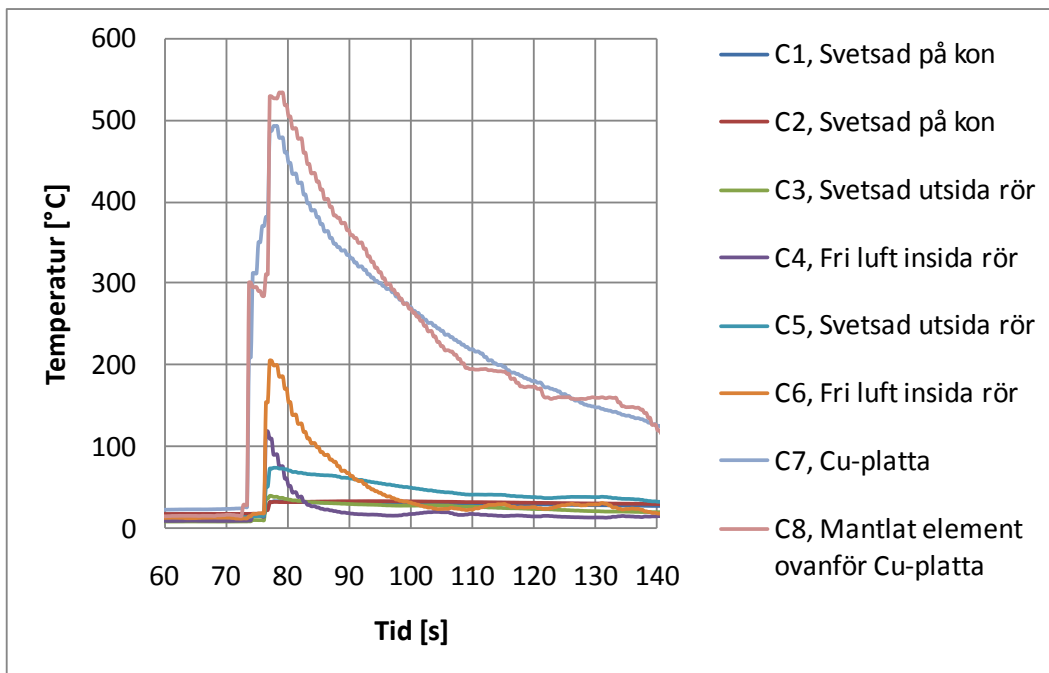
Figur 15 MegaTwin, test 7

Tabell 9 Maximal temperatur för MegaTwin, test 7

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparrplatta °C	Cu-platta °C
21 respektive 32	57 respektive 74	191 respektive 251	24	480

Tid från antändning till explosion uppskattades från videofilm till ca 12 sekunder och tid till explosion två var ca 14 sekunder (två sekunder efter första explosionen). Den kraftiga temperaturstegringen skedde under de sista fyra sekunderna. Efter den första explosionen föll rester av fyrverkeridelen ner dels på kopparrplattan men även på marken under kopparrplattan, något som sågs via videokamera. Den andra explosionen skedde på marken, vilket kan vara anledningen till att kopparrplattan uppvisade en lägre temperatur jämfört med test 6. Kopparrplattan uppvisade betydligt högre värden än övriga termoelement. Explosionen för MegaTwin var noterbart kraftigare jämfört med Eclipse och Apollo.

Test 8 - Nova



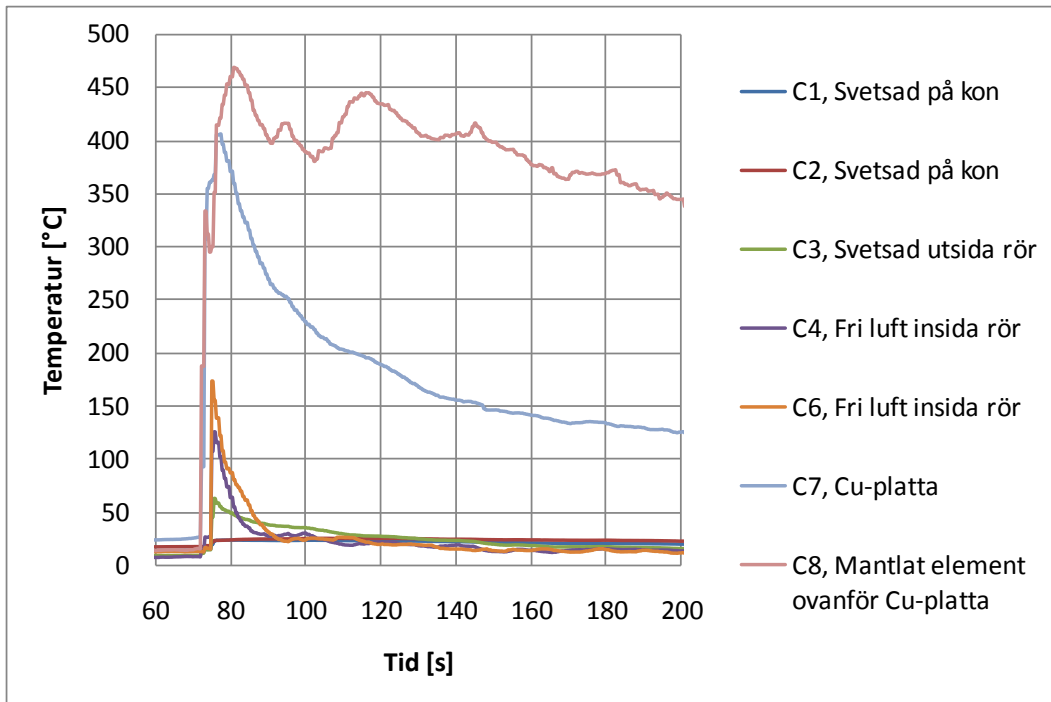
Figur 16 Nova, test 8

Tabell 10 Maximal temperatur för Nova, test 8

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
32 respektive 33	39 respektive 75	119 respektive 206	533	493

Tid från antändning till explosion uppskattades via videofilm till ca 12 sekunder. Den stora temperaturstegningen skedde de sista 5 sekunderna innan explosionen, från det att drivningsgaserna träffade kopparkplattan (bedömdes visuellt via video). Det mantlade termoelementet och kopparkplattan uppvisade betydligt högre värden än övriga termoelement. Efter explosionen brann rester av fyrverkeripjäsen upp på kopparkplattan under ca 30 sekunder.

Test 9 - Nova



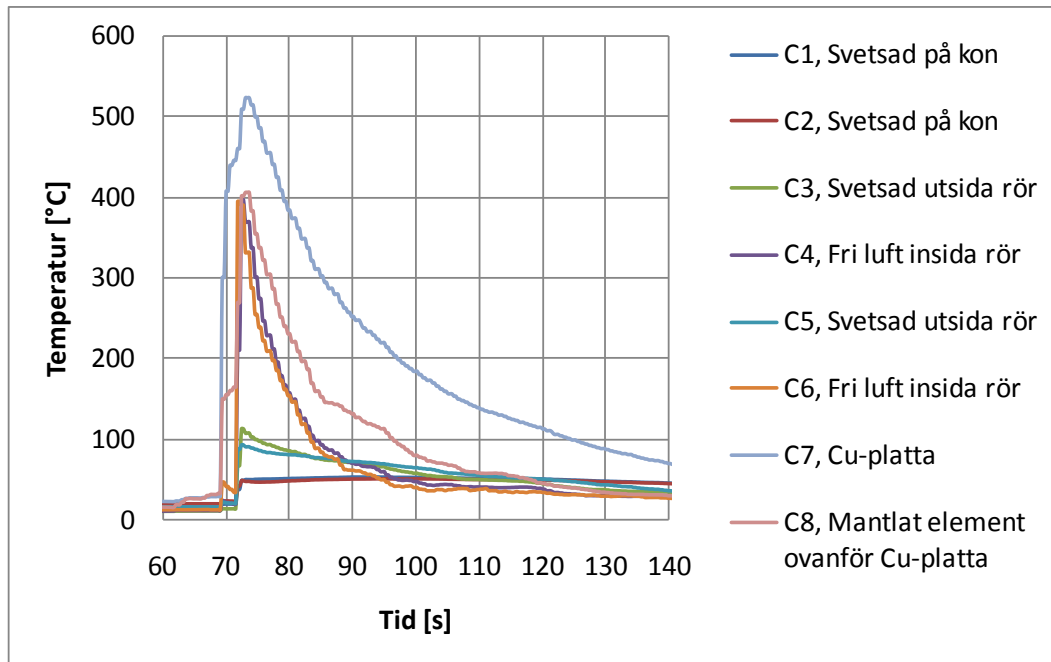
Figur 17 Nova, test 9

Tabell 11 Maximal temperatur för Nova, test 9

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparkplatta °C	Cu-platta °C
25 respektive 26	62, -	125 respektive 173	469	406

Tid från antändning till den första explosionen var ca 13 sekunder. Den stora temperaturstegningen skedde de sista 5 sekunderna, från det att drivningsgaserna träffade kopparkplattan. Efter explosionen ramlade rester av fyrverkeridelen ner på kopparkplattan där de antändes och brann direkt emot det mantlade termoelementet under ca 94 sekunder, vilket gjorde att detta visade högre värden än kopparkplattan under en längre tid. Fyrverkeriresternas låga avtog först direkt efter explosionen för att sedan växa sig större igen, något som troligtvis överensstämde med den andra toppen som skedde efter 116 sekunder för det mantlade elementet i Figur 17. Termoelement C5 som var svetsad på utsidan av röret gick sönder i explosionen och redovisas därför inte.

Test 10 - MegaTwin



Figur 18 MegaTwin, test 10

Tabell 12 Maximal temperatur för MegaTwin, test 10

C1, C2. Fastsvetsade på utsida av konen, °C	C3, C5. Fastsvetsade på utsida av rör, °C	C4, C6. Termoelement hängande fritt, °C	Termoelement ovanför kopparsplatta °C	Cu- platta °C
51 respektive 52	93 respektive 112	394 respektive 396	406	523

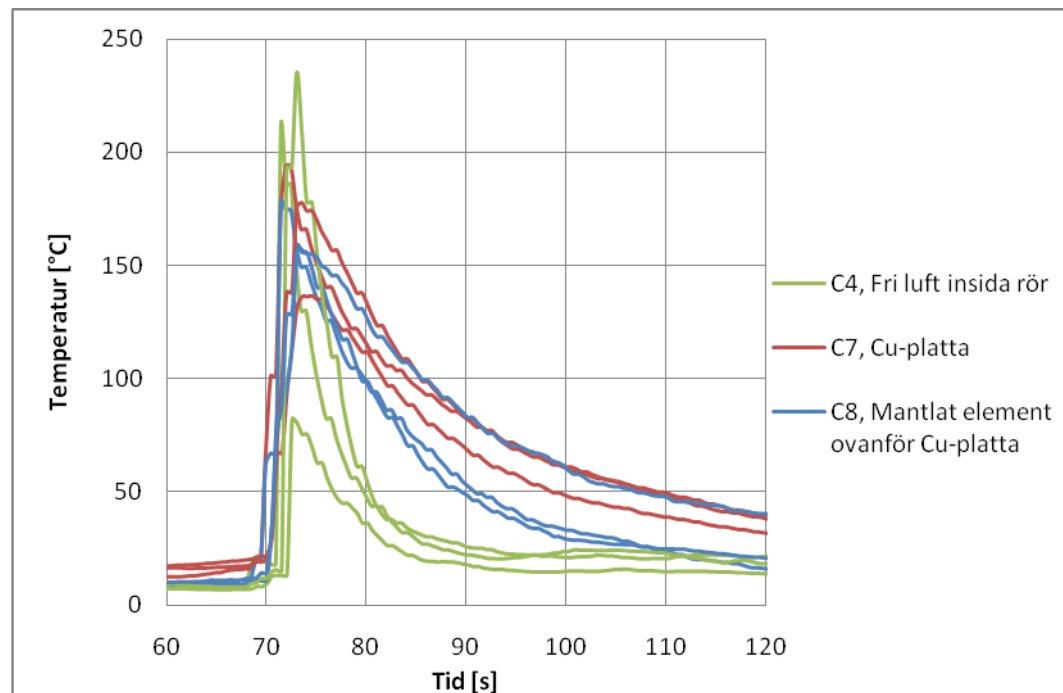
Tid från antändning till den första explosionen uppskattades från videofilmen till ca 10 sekunder och tid till den andra explosionen uppskattades från videofilmen till ca 12 sekunder (två sekunder efter första explosionen). Den kraftiga temperaturstegringen skedde under de sista fem sekunderna, d.v.s. då drivningsgaserna nådde kopparsplattan. Under detta försök uppvisade de fritt hängande termoelementen en betydligt högre temperatur jämfört med test 6 och test 7 (tester utförda med MegaTwin).

4.1 Resultatjämförelser mellan identiska försök

Nedanstående jämförelser ger då en liten uppfattning om variationerna mellan identiska försök samt de fall då någon ändring har gjorts. I Figur 19-Figur 22 skiljs termoelementen åt genom olika färger. En jämförelse mellan maximala uppmätta temperaturer, procentuell skillnad och variationerna i toppvärde mellan identiska försök ses i Tabell 13. Procentuellt ligger den högsta uppmätta temperaturen ca 13-41% högre än den lägsta uppmätta ”topptemperaturen” för kopparplattan och det mantlade termoelementet (undantaget kopparplattan för MegaTwin). Andra termoelement, t.ex. de svetsade på det perforerade röret, uppvisar betydligt högre procentuella skillnader.

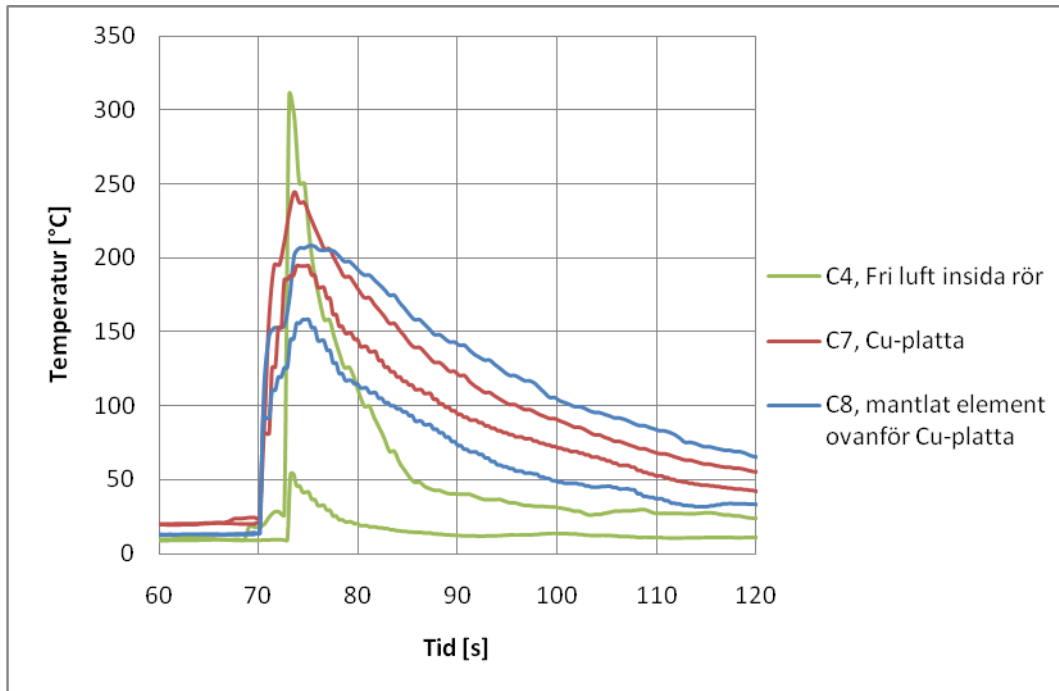
Tabell 13 Maximal temperatur och variation mellan maximal temperatur

Termoelement	Eclipse (test 1-3)			Apollo (test 4-5)			MegaTwin (test 6-7, 10)			Nova (test 8-9)		
	T _{max}	ΔT	%	T _{max}	ΔT	%	T _{max}	ΔT	%	T _{max}	ΔT	%
Utsida kon	38	11	41	42	20	91	52	21	68	32	7	28
Utsida kon	38	12	46	39	16	70	51	19	59	33	7	27
Svetsad rör	65	37	132	74	53	252	112	55	96	62	23	59
Luft	235	153	187	310	256	474	396	226	133	125	6	5
Svetsad rör	65	19	41	81	53	189	93	19	26	75	-	-
Luft	241	69	40	334	243	267	394	143	57	206	33	19
Kopparplatta	194	57	42	244	49	25	599	119	25	493	87	21
Termotråd	178	21	13	209	50	31	407	383	1596	533	64	14



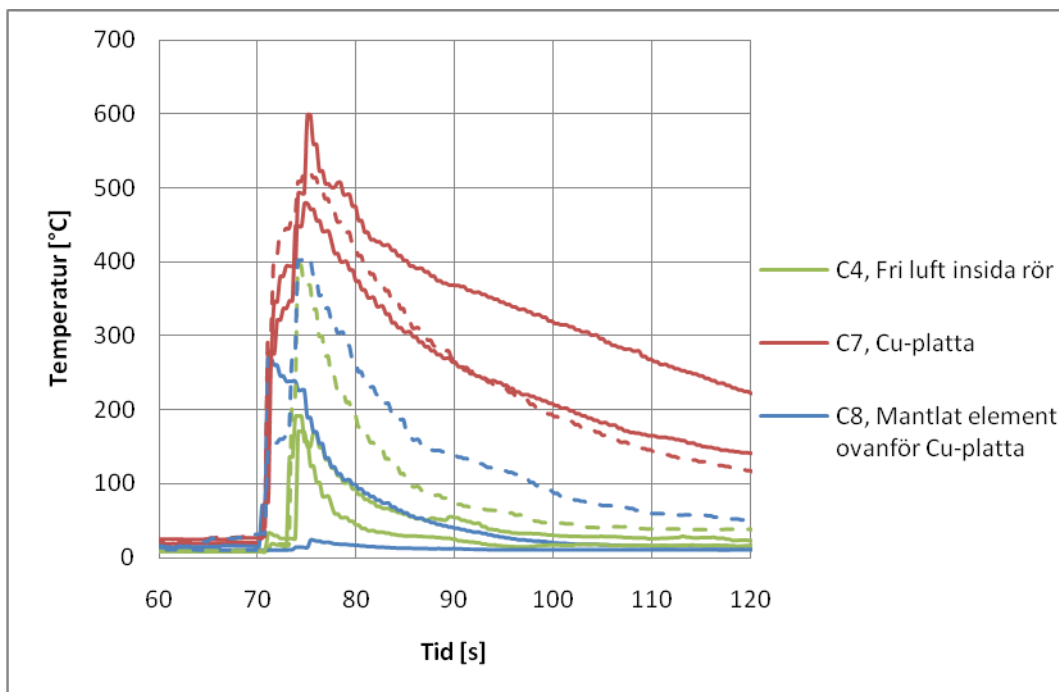
Figur 19 Variation mellan test 1-3, d.v.s. fyrverkeripjäsen Eclipse

Eclipse uppvisar bra repeterbarhet, förutom för termoelementen hängande fritt i luften. Variationen beror troligen på att termoelementen träffats av varma metaller/metallsalter vid explosionen.



Figur 20 Variation mellan test 4-5, d.v.s. fyrverkeripjäsen Apollo

Apollo uppvisar bra repeterbarhet, förutom för termoelementen hängande fritt i luften. Variationen beror troligen på att termoelementen träffats av varma metaller/metallsalter vid explosionen.

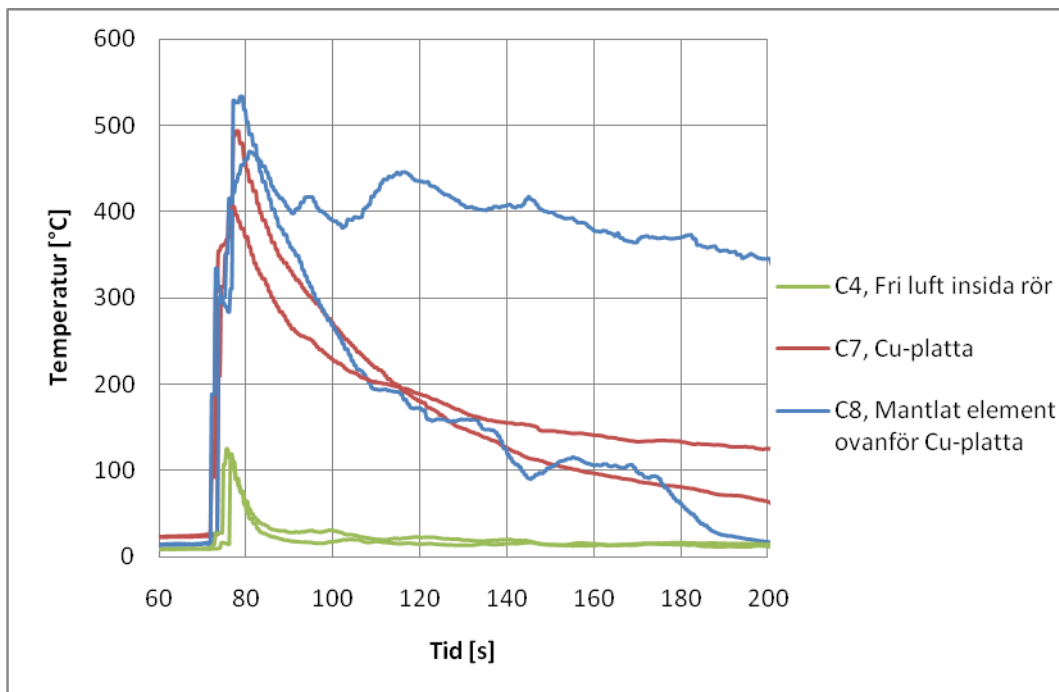


Figur 21 Variation mellan test 6-7 och test 10, d.v.s. fyrverkeripjäsen MegaTwin. Försöken med kortare styrpinne (17 cm jämfört med 22 cm) visas med streckad linje.

MegaTwin uppvisar god repeterbarhet. Dock tillkommer andra osäkerheter; restprodukter av fyrverkeripjäsen faller under explosionsfasen ner på kopparplattan och brinner ut under ett antal sekunder/minuter. För MegaTwin så gjordes även ett försök med kortare pinne (visas med streckad linje), vilket uppvisar högre temperaturer för samtliga termoelement förutom på kopparplattan.

Temperaturskillnaderna för kopparplattan och det mantlade termoelementet beror på att fyrverkeripjäsen består av två olika explosioner med en två sekunders fördröjning emellan dem. Under test 7 och test 10 faller först fyrverkerirester ner på kopparplattan och antänds efter den första explosionen för att sedan blåsas bort från kopparplattan av tryckvågen från den andra explosionen, något som syns på videon, och landa på marken istället för på kopparplattan som i test 6.

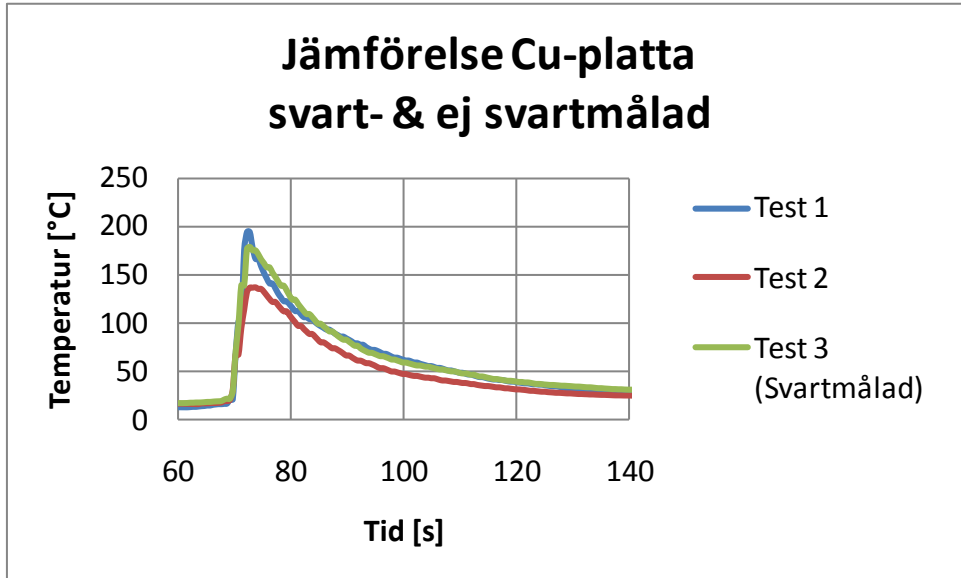
I test 6 brinner rester av raket, papper plus metaller/metallsalter, upp på kopparplattan och ger ett högre temperatur på kopparplattan. Däremot uppvisar det mantlade termoelementet högst värde för test 10. Det mantlade termoelementet är givetvis mer känsligt eftersom konvektionsdelen spelar en betydligt större del i ett termoelement jämfört med fallet med en kopparplatta. En tänkbar förklaring kan vara att den brand som skett på kopparplattan ej befann sig i direkt anslutning till det mantlade termoelementet och därför inte registrerades. En annan förklaring kan tänkas vara att tryckvågen från explosionerna förflyttat det mantlade termoelementet till ett läge som ej påverkas av branden, något som dock ej noterades vid övriga försök.



Figur 22 Variation mellan test 8-9, d.v.s. fyrverkeripjäsen Nova.

För Nova beror den stora skillnaden i det mantlade termoelementets temperatur på beteendet efter fyrverkeripjäsen exploderat. För båda försöken faller delar av raket ner på kopparplattan och antänds; dock slocknar test 8 betydligt snabbare än test 9 (30 jämfört 94 sekunder) och ger därav den stora skillnaden i temperatur på kopparplattan och termoelementet ovan kopparplattan. Nova uppvisar förutom för det mantlade termoelementet god repeterbarhet.

Under testserien med Eclipse användes två olika kopparplattor för fyrverkeripjäsen Eclipse; en belagd med svart färg (emissivitet antas vara lika med 1) och en utan beläggning (emissivitet för koppar med ett oxidlager är 0.78 och 0.02 utan oxid⁹). De två första testerna av Eclipse gjordes med kopparplattan utan beläggning och det sista testet gjordes med kopparplattan vilken hade beläggning. Resultatet kan ses i Figur 23. Som synes är skillnaderna mellan Test 1 och Test 2 i samma storleksordning som skillnaden mellan Test 3 och Test 2.

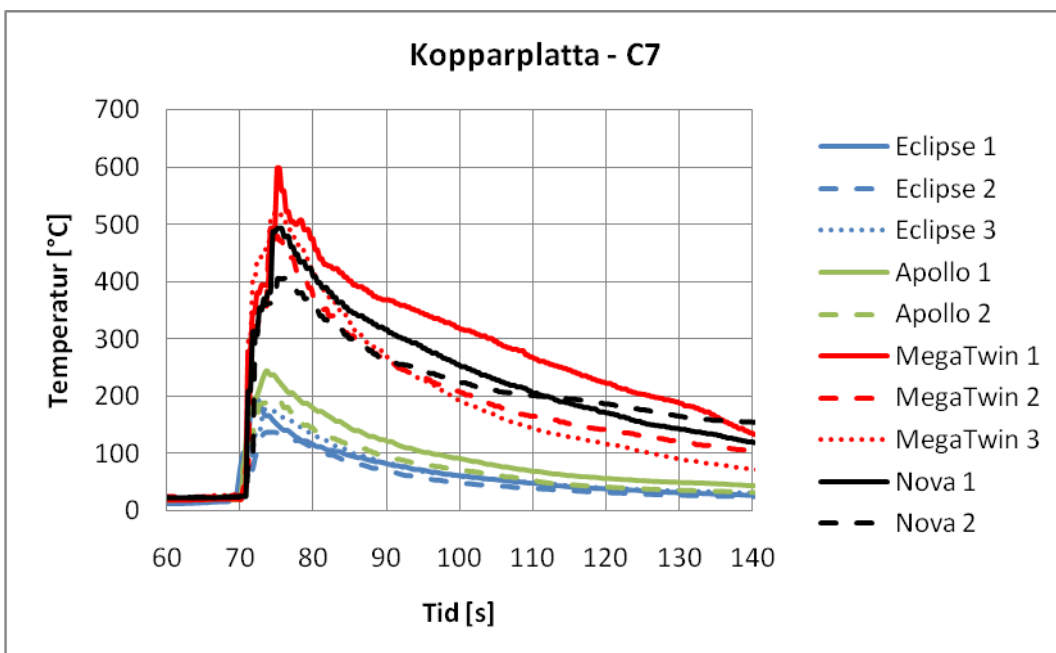


Figur 23 Uppmätt temperatur på kopparplattan

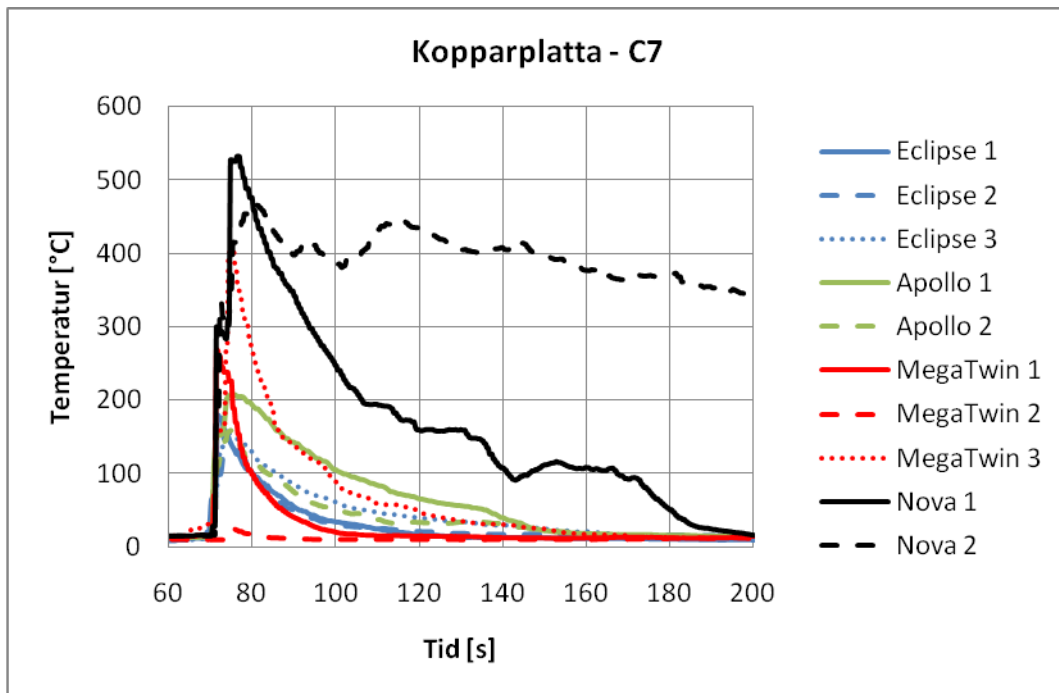
4.2 Variation mellan olika fyrverkeripjäser

De fastsvetsade termoelementen på konen och det perforerade röret uppvisar en måttlig temperaturökning oberoende av vilken fyrverkeripjäsa som testas. Termoelementen hängande fritt i luften visar under samma test väldigt lika värden, vilket är att vänta. Temperaturerna som de fritt hängande termoelementen mäter beror mycket på hur metallerna/metallsalterna flyger ut från explosionen och träffar termoelementen.

För kopparplattan och det mantlade termoelementet, se Figur 24 och Figur 25, delas fyrverkeripjäserna upp i två olika nivåer. Eclipse och Apollo uppvisar båda betydligt lägre temperaturer på både kopparplattan och det mantlade termoelementet jämfört med MegaTwin och Nova. För kopparplattan uppvisar MegaTwin något högre värden jämfört med Nova. Däremot uppvisar Nova klart högst temperatur på det mantlade termoelementet.



Figur 24 Temperaturer uppmätta på kopparplattan



Figur 25 Temperaturer uppmätta av det mantlade termoelementet

5 Antändningsförmåga

För att kunna avgöra raketernas antändningsförmåga för olika material behöver man beräkna vilken värmeeffekt de avger. Ofta mäter man brandeffekten direkt i en brandprovning genom att mäta syreförbrukningen. Eftersom detta inte fungerar för raketerna p.g.a. deras eget syreinhåll görs här istället en uppskattning av värmeeffekten från kopparplattans temperatur.

5.1 Uppvärmning av material

Den allmänna värmeledningsekvationen skrivs

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (1)$$

Eftersom det är svårt att lösa värmeledningsekvationen exakt görs i regel vissa antaganden. De vanligaste är:

- Kroppen approximeras som termiskt tunn
- Kroppen approximeras som halvoändlig

5.1.1 Termiskt tunna material

Allt motstånd finns under detta antagande vid ytan och den allmänna värmeledningsekvationen kan skrivas

$$\rho c_p d \frac{dT}{dt} = \dot{q}_e'' - h_c(T - T_{amb}) - \epsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4) \quad (2)$$

där	ρ	är densitet, [kg/m ³]
	c_p	är specifik värmekapacitet, [kJ/kgK]
	d	är materialets tjocklek, [m]
	T	är materialets temperatur, [K]
	\dot{q}_e''	är total infallande strålning, [W/m ²]
	h_c	är konvektiva värmeövergångstalet, [W/m ² K]
	T	är materialets temperatur, [K]
	T_{amb}	är omgivningens temperatur, [K]
	ϵ	är emissivitet, [-]
	σ	är Stefan Boltzmanns konstant, [5.67 x 10 ⁻⁸ Wm ⁻² K ⁻⁴]

Vid korta antändningstider och små temperaturskillnader kan man beräkna antändningstiden¹⁰ för ett material som värms på båda sidor, alternativt är isolerat på ena sidan som

$$t_{ig} \approx \frac{\rho c_p d (T_{ig} - T_{amb})}{\dot{q}_e''} \quad (6)$$

där	t_{ig}	är antändningstid, [s]
	T_{ig}	är antändningstemperatur, [°C, K]

Ekvation (6) leder till en underskattning av antändningstider eftersom kylning helt försummas.

Det finns även andra teorier att beräkna antändningstiden för termiskt tunna material. För uppvärmning på ena sidan kan antändningstiden¹¹ beräknas som

$$t_{ig} = \frac{\rho c_p d}{2h_c} \ln \left(\frac{\xi \dot{q}_e''}{\xi \dot{q}_e'' - 2h_c(T_{ig} - T_{amb})} \right) \quad (7)$$

där	ξ	är absorptivitet, [-]
-----	-------	-----------------------

om man bortser från strålningsförlusterna men inkluderar konvektiva förluster.

5.1.2 Halvoändliga material

Ett halvoändligt material är ett material som är oändligt i två riktningar och ändligt i tjocklek. Tjockleken måste även vara tillräckligt stor för att ytan vilken ej är exponerad mot brand skall vara opåverkad. För att antagandet om halvoändlighet skall gälla måste ekvation (9)¹² gälla;

$$L \geq 2.8\sqrt{\alpha t} \quad (9)$$

där L är tjocklek på materialet, [m]
 α är värmediffusivitet, [m²/s]
 t är tid, [s]

Genom antagande av halvoändlighet och en konstant strålningspåverkan kan den allmänna värmeledningsekvationen lösas med hjälp av Laplacetransformationer. Ekvation (10)¹² ger ett uttryck för hur yttemperaturen varierar med tiden;

$$T_s = T_{amb} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \dot{q}_s'' \sqrt{\frac{t}{k\rho c}} \quad (10)$$

där T_s är yttemperatur, [°C]
 $k\rho c$ är termisk tröghet, [W²/m⁴K²]

Genom vetskap om infallande strålning, tiden materialet har varit exponerat mot värmeflödet och materialets termiska tröghet kan materialets yttemperatur beräknas.

5.2 Uppskattning av totala värmestrålningen till kopparplattan

Den totala strålningen till kopparplattan beräknas genom att ta hänsyn till konvektions och strålningsförluster som

$$\text{Total strålning till kopparplattan} = \text{Netto strålning} + \text{Konvektionsförlust} + \text{Strålningsförlust} \quad (11)$$

5.2.1 Uppskattning av värmestrålning från fyrverkeripjäsernas drivning

Den kopparplatta som placerades under drivraketen var endast 0.2 mm tjock vilket ger ett Biots tal på 1×10^{-5} vilket är mindre än 0.1. Detta gör att man kan anta att temperaturen i materialet är densamma materialet igenom och infallande nettostrålning ges då av

$$\text{nettostrålning} = Cp \times m \times \frac{\Delta T}{t} / A \quad (12)$$

där Cp är den specifika värmekapaciteten för koppar, m är kopparplattans massa, t är tiden i sekunder (beräknas som tid från den kraftiga temperaturstegringen börjar till explosion av fyrverkeripjäsen) och A är kopparplattans area. ΔT beräknas som skillnaden mellan maximalt uppmätt temperatur och den temperatur kopparplattan hade precis innan den kraftiga temperaturstegringen sker (d.v.s. mätt från den tidpunkt då de varma drivningsgaserna når kopparplattan). Kopparplattans temperatur ökade i vissa tester upp till 5°C innan den kraftigare temperaturstegringen sker. Materialdata för kopparplattan kan ses i Tabell 14 och beräknad strålning kan utläsas ur Tabell 15. I ekvation (12) antas strålningen vara konstant under förloppet.

Tabell 14 Materialdata för kopparplattan

Mått på kopparplatta Längd x Bredd x Höjd [cm]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Massa [kg]	Cp [kJ/kgK]
10x10x0.02	2x10 ⁻⁶	8940	0.018	380

Tabell 15 Beräknad nettostrålning för fyrverkeripjäserna

Fyrverkeripjäs	ΔT	t [s]	\dot{q}'' [kW/m ²]
Eclipse, försök 1	173	3	39
Eclipse, försök2	116	4.5	17
Eclipse, försök3	156	3.5	30
Apollo, försök 1	212	4.5	32
Apollo, försök2	174	4	30
MegaTwin, försök 1	579	5	76
MegaTwin, försök 2	453	4	72
MegaTwin, försök 3	485	6	64
Nova, försök 1	467	5	65
Nova, försök 2	380	5	50

5.2.2 Konvektionsförluster

Konvektionsförlusterna kan beräknas enligt ekvation (13)

$$\dot{q}_{konv}'' = h\Delta T + h_c\Delta T \quad (13)$$

där h är det konvektiva värmeövergångstalet för den sida vilken ej är exponerad mot fyrverkeripjäsen, 6 W/m²K, och h_c är det konvektiva värmeövergångstalet för den sida vilken är exponerad mot fyrverkeripjäsen, 12 W/m²K^{13, 14}. ΔT är skillnaden mellan plattans temperatur och omgivningens temperatur för varje tidssteg. Den totala konvektionsförlusten beräknas sedan genom att summera konvektionsförlusterna för varje tidssteg och dividera summan med antal tidssteg. Resultatet kan ses i Tabell 16.

Tabell 16 Beräkning av konvektionsförluster

Fyrverkeripjäs	\dot{q}_{konv}'' [kW/m ²]
Eclipse, försök 1	2
Eclipse, försök2	1
Eclipse, försök3	2
Apollo, försök 1	3
Apollo, försök2	2
MegaTwin, försök 1	6
MegaTwin, försök 2	5
MegaTwin, försök 3	7
Nova, försök 1	6
Nova, försök 2	5

5.2.3 Strålningsförluster

Strålningsförlusterna beräknas enligt ekvation (14)

$$\dot{q}_r'' = 2\sigma\epsilon(T^4 - T_{amb}^4) \quad (14)$$

Ekvation dubblas för att ta hänsyn till strålning från båda sidorna av kopparplattan. Som synes i ekvation (14) så varierar strålningen kraftigt med temperaturen. Den totala strålningsförlusten i ekvation (11) beräknas genom att summera strålningsförlusten för varje tidpunkt, från det att fyrverkeripjäsen antänds till dess den exploderar, och dividera summan med antal tidssteg. Strålningsförlusterna kan läsas ur Tabell 17.

Tabell 17 Kopparplattans strålningsförluster

Fyrverkeripjäs	\dot{q}_r'' [kW/m ²]
Eclipse, försök 1	2
Eclipse, försök2	1
Eclipse, försök3	2
Apollo, försök 1	5
Apollo, försök2	3
MegaTwin, försök 1	23
MegaTwin, försök 2	16
MegaTwin, försök 3	26
Nova, försök 1	20
Nova, försök 2	14

5.2.4 Total strålning till kopparplattan

Den totala strålningen beräknas enligt ekvation (11) och resultaten ses i Tabell 18.

Tabell 18 Infallande strålning, beräknat enligt ekvation (11)

Fyrverkeripjäs	\dot{q}_e'' [kW/m ²]
Eclipse, försök 1	42
Eclipse, försök2	20
Eclipse, försök3	33
Apollo, försök 1	40
Apollo, försök2	34
MegaTwin, försök 1	105
MegaTwin, försök 2	93
MegaTwin, försök 3	97
Nova, försök 1	91
Nova, försök 2	69

5.2.5 Värmestrålning från fyrverkeripjäserna

Den värmestrålning som fyrverkeripjäsen avger uppskattas genom att anta att den strålar som en punktkälla och ges då av¹⁵

$$\dot{q}_{fyrverkeri}'' = \frac{\dot{q}_e''}{F_{ij}} \quad (15)$$

där F_{ij} är synfaktorn = $\frac{\text{Area kopparplatta}}{\pi \times \text{Avstånd från pjäs till kopparplatta}^2} = \frac{0.1^2}{\pi \times 0.27^2} = 0.044$
 \dot{q}_e'' är värmestrålning från fyrverkeripjäsa enligt Tabell 18, [kW/m²]

Uppskattad värmestrålningen från fyrverkeripjäserna kan ses i Tabell 19.

Tabell 19 Värmestrålning från fyrverkeripjäser

Fyrverkeripjäsa	$\dot{q}_{fyrverkeri}''$ [kW/m ²]
Eclipse, försök 1	950
Eclipse, försök2	459
Eclipse, försök3	760
Apollo, försök 1	896
Apollo, försök2	782
MegaTwin, försök 1	2386
MegaTwin, försök 2	2103
MegaTwin, försök 3	2202
Nova, försök 1	2074
Nova, försök 2	1569

5.2.6 HRR från fyrverkeripjäserna

HRR beräknas genom att anta att strålningen som presenteras i tabell 18 kom från en punktkälla som strålar över en hel sfär med radien 27 cm. Resultatet av HRR presenteras i Tabell 20.

Tabell 20 HRR från fyrverkeripjäsa

Fyrverkeripjäsa	HRR _{fyrverkeri} [kW]
Eclipse, försök 1	39
Eclipse, försök2	18
Eclipse, försök3	30
Apollo, försök 1	37
Apollo, försök2	31
MegaTwin, försök 1	96
MegaTwin, försök 2	85
MegaTwin, försök 3	89
Nova, försök 1	84
Nova, försök 2	63

5.3 Antändning

Det finns en rad olika kriterier för ett materials antändning. Dessa kriterier är baserade på experimentell data, observationer och intuition¹⁶. För en extern tillförd värmekälla värms materialet upp genom konvektion, värmeledning och strålning. Av dessa termer anses uppvärmning genom strålning vara den viktigaste och dominerande termen i en brand⁵. För antändning finns tre krav. Ämnets temperatur måste vara tillräckligt hög, ämnet måste utsöndra en tillräckligt stor koncentration av pyrolysgaser, samt syre/pyrolysblandningen måste vara inom rätt intervall för att antändning ska ske. För antändning krävs alltså att materialet värms upp till en viss temperatur, där en tillräckligt stor del pyrolysgaser utsöndras och antänds då luft/gasblandningen har rätt koncentration. I en skola finns en rad olika material närvarande. Exempel på material som kan antas vara utsatta för fyrverkerier och deras antändningstemperatur ses i Tabell 21.

Tabell 21 Antändningstemperatur och termisk tröghet^{5, 17}

Material	Antändningstemperatur [°C]	Termisk tröghet [W^2s/m^4K^2]
Trä (Ek)	297-332	3.2×10^5
Papper	218-248/407-450	5.6×10^4
Tyg	302	6.0×10^4
Plast (PMMA)	280-300	3.2×10^5

Dessa temperaturer gäller för rena material och närvaro av gnistor, något som även existerar med fyrverkeripjäser. Antändning beror på ett flertal parametrar, t.ex. materialets tjocklek och tiden materialet utsätts för strålning.

5.3.1 Antändning av termiskt tunna material

Antändningstider för ett antal material med en tjocklek av 1 mm, beräknade ur ekvation (6), presenteras Tabell 22.

Tabell 22 Antändningstider för termiskt tunna material. $t_{\text{fyrverkeri}}$ är tiden som objekten utsätts för strålning. De fyllda rutorna representerar fall då $t_{\text{ig}} < t_{\text{fyrverkeri}}$

Fyrverkeripjäs	\dot{q}''_e	$t_{\text{fyrverkeri}}$	$t_{\text{ig, papper}}$	$t_{\text{ig, tyg}}$	$t_{\text{ig, trä}}$	$t_{\text{ig, PMMA}}$
Eclipse, försök 1	42	3	3-5	10-16	13-14	10-11
Eclipse, försök 2	20	4.5	4-10	20-33	26-29	21-23
Eclipse, försök 3	33	2.5	5-6	8-20	16-18	12-14
Apollo, försök 1	39	4.5	4-5	6-17	13-15	11-12
Apollo, försök 2	34	4	5-6	16-19	15-17	12-14
MegaTwin, försök 1	105	5	2	5-6	5-6	4-5
MegaTwin, försök 2	93	4	2	3-7	6	4-5
MegaTwin, försök 3	97	6	2	6-7	5-6	4-5
Nova, försök 1	91	5	2	3-7	6-7	5-5
Nova, försök 2	69	5.5	3	8-10	8-9	6-7

Ur tabellen ses att material som papper, plast och tyg (t.ex. gardiner och t-shirts eller skjortor) antänds för de större raketerna MegaTwin och Nova. Däremot pekar testen på att material som trä, av tjockleken 1 mm, endast antänds av MegaTwin. Ett tänkbart scenario är att explosionen av MegaTwin och Nova antänder papper som sedan sprider sig och antänder övriga material. Även de mindre raketerna Apollo och Eclipse kan antända pappersark.

5.3.2 Antändning av halvoändliga material

Yttertemperatur för ett antal material beräknas via ekvation (10) och resultatet ses i Tabell 23. Dessa värden jämförs sedan med antändningstemperaturer ur Tabell 21 för att avgöra om en antändning är möjlig. Tabell 23 ger ett approximativt värde på yttertemperaturen för material vilka kan befinna sig i en skolmiljö.

Tabell 23 Beräkning av yttertemperatur. Värden i fyllda rutor antas antända ($T > T_{ig}$)

Fyrverkeripjäs	\dot{q}''_e	$t_{\text{fyrverkeri}}$	T_{Papper}	T_{Tyg}	$T_{\text{Trä}}$	T_{PMMA}
Eclipse, försök 1	42	3	345	333	144	144
Eclipse, försök2	20	4.5	204	197	85	85
Eclipse, försök3	33	2.5	252	244	105	105
Apollo, försök 1	39	4.5	399	385	167	167
Apollo, försök2	34	4	328	317	137	137
MegaTwin, försök 1	105	5	1120	1082	468	468
MegaTwin, försök 2	93	4	882	852	369	369
MegaTwin, försök 3	97	6	1131	1093	473	473
Nova, försök 1	91	5	973	940	407	407
Nova, försök 2	69	5.5	772	746	323	323

Om man inbördes jämför raketerna ses att de mindre raketerna Eclipse och Apollo rimligen har lägre chans att antända material. En jämförelse av beräknade yttertemperaturer med antändningstemperaturer från Tabell 21 ger att material som papper, tyg, trä och plast antänds. Det är troligt att en brand kan spridas från papper eller tygprodukter till närliggande träprodukter, ett scenario som även bekräftas av de försök som Räddningstjänsten Syd har genomfört¹⁸. Vid försöken antändes en bit wellpapp av en fyrverkeripjäs och wellpappen spred sedan branden till en trälåda.

I skolor finns möbler, t.ex. stolar och ibland soffor, vilka består av ett tyg ovanpå ett isolerande material. Dessa möbler kräver liten infallande energi för att antändas. Vidare utgör den lösa inredningen (gardiner, möbler etc.) en stor del av brandbelastningen i ett rum och brandkraven är tyvärr mycket låga om ens några för dessa. Mycket skulle vara vunnet om brandkrav infördes på dessa¹⁹.

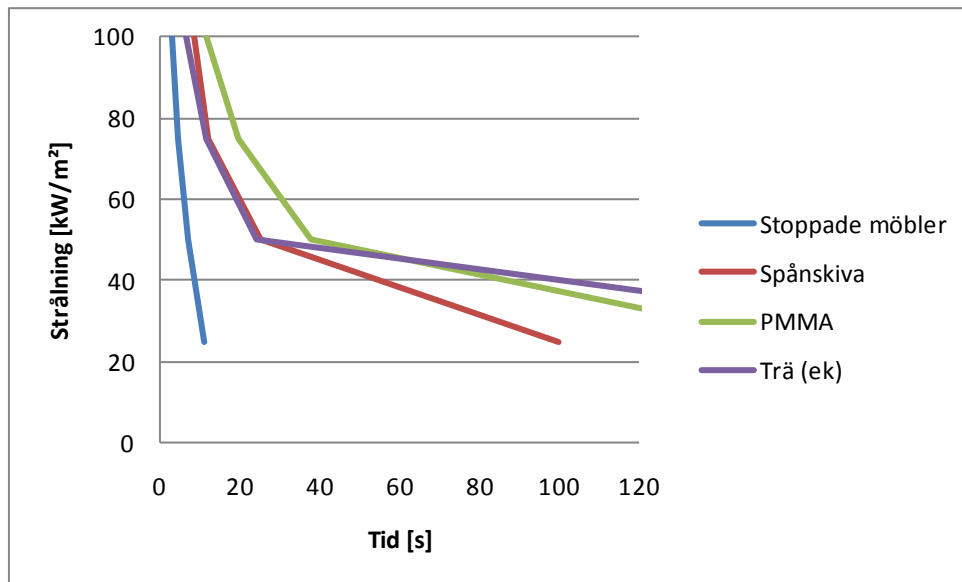
5.4 Jämförelse med Konkallorimetern ISO 5660

Den mot kopparplattans infallande strålning, 20-105 kW/m², kan jämföras med tester gjorda enligt ISO 5660²⁰. Enligt ISO 5660 utsätts en provkropp med dimension 100 mm x 100 mm för en bestämd strålningsnivå mellan 0-100 kW/m² där en standard av 50 kW/m² ges²¹. För lättantändliga material kan denna strålning sänkas till 35 kW/m² för att uppnå ett långsammare antändningsförlopp²¹. I Tabell 24 och Figur 26 redovisas Babrauskas²² resultat av antändningstider för ett antal material där strålningen varieras 25-100 kW/m² i en konkallorimeter.

Tabell 24 Antändningstid för olika material enligt Babrauskas²²

Strålning [kW/m ²]	Trä (ek) [s]	PMMA [s]	Stoppade möbler [s]	Spånskiva [s]
25	216	161	10-12	100
50	24	38	6-10	25
75	12	20	4-5	12
100	6	12	3-4	8

Man ser tydligt att material som möbler och trä kan antändas då fyrverkeripjäsen befinner sig ca. 27 cm från dessa material. Tid till antändning minskar med avståndet till fyrverkeripjäsen. Då beräknad strålning, (20-105 kW/m²), på ett avstånd av 27 cm från fyrverkeripjäsens drivningsdel överensstämmer med använd strålning i konkalorimetern kan konkalorimetern ge en fingervisning om beteendet hos material utsatta för drivningsdelen. Om fyrverkeripjäsen skulle placeras närmare kopparplattan skulle infallande strålning öka markant, något som innebär att konkalorimeterns användningsområde som testmetod skulle minska.



Figuren 26 Tid till antändning för olika strålningsnivåer i konkalorimetern

5.5 Jämförelse med Single Burning Item 13823-SBI

Inom Europa klassificeras material enligt EN 13501-1 efter provning i Single Burning Item EN 13823-SBI²³. I denna metod utsätts materialet för en propanbrännare på 30 kW under 20 minuter som resulterar i en strålningsnivå²⁴ mot provkroppsytan på 40 kW/m², d.v.s. i samma storleksordning som de i testen uppmätta strålningsnivåerna. Detta gör att SBI resultat kan ge en viss indikation på hur material beter sig som befinner sig i närheten av raketens drivningsdel.

För brännbara material sker då en successiv flamspridning som leder till en klassning i någon av klasserna B, C, D eller E²³. Klasserna har en koppling till referensscenariot ISO 9705 där övertändning sker för material med klassificeringen Euroklass C eller sämre. Tid till övertändning i referensscenariot för Euroklass E är mindre än 2 min, Euroklass D mellan 2-10 min och Euroklass C mellan 10-20 min. Däremot nås ej övertändning för ett material med klassificeringen Euroklass B²³. Det är troligt att material med klassificeringen Euroklass C, D och E kan antändas och eventuellt sprida brand då de, på ett avstånd av ca. 27 cm, utsätts för en fyrverkeripjäsa. Dock bör påpekas att EN 13823-SBI olik fyrverkeripjäsens flamma är av typen diffusionsflamma samt att provningen i EN 13823-SBI pågår betydligt längre än den tid en fyrverkeripjäsa skulle utsätta ett material för värmestrålning, något som försvårar jämförelsen. Det finns även ett beräkningsprogram framtaget för att beräkna ett materials beteende i SBI och Room Corner test baserat på resultaten från konkalorimetern²⁵.

6 Diskussion

Rapporten fokuserar på värmen från fyrverkeripjäsens drivhylsa, eftersom det är svårt att fånga de metallsalter som skapar den synliga effekten av fyrverkerier. Experimenten ger en ungefärlig siffra för HRR då experiment och beräkningar alltid är förknippade med osäkerheter. En experimentell osäkerhet är att brinnande material, rester av fyrverkeripjäsen, föll ner på kopparplattan och därmed gav en högre temperatur under en längre tid. Detta leder till en överskattning av HRR i vissa fall. Andra osäkerheter är t.ex. förmodad emissivitet av kopparplattan. Dock är dessa osäkerheter små i förhållande till det faktum att inte metallsalterna fångas upp i experimenten.

Beräkningarna bygger på antagandet att plattan inte är i termisk kontakt med den experimentella riggen. Detta var inte fallet i verkligheten, även om kontakten var liten. Detta resulterar i en underskattning av HRR. Vidare är det alltid svårt att sätta ett värde för den konvektiva värmeöverföringskoefficienten.

Eftersom experimenten utfördes utomhus kan t.ex. vind leda till en högre värmeövergångskoefficient, något som leder till en underskattning av HRR. Slutligen beräknades HRR genom att anta att strålningen kom från en punktkälla som strålar över en hel sfär med radien 27 cm. Detta kommer helt klart att leda till en överskattning av HRR för drivningsdelen.

Vid beräkning av strålningen tas enbart den kraftiga temperaturstegringen i beaktande. För de fyrverkeripjäser som testades var tid från antändning till explosion ca. 12 sekunder varav de kraftiga drivningsgaserna varade de sista 4-6 sekunderna, något som gav en kraftig temperaturökning. Under försöken var fyrverkeripjäsen fixerad och kunde utsätta kopparplattan för en temperaturökning under hela förloppet. I skolmiljöer är det möjligt att fyrverkeripjäsen färdats ett antal sekunder innan den fastnar t.ex. i ett hörn och utsätter närliggande möbler/objekt för en värmepåverkan.

Den beräknade HRR för fyrverkerier, 20-100 kW, är i samma storleksordning som en liten papperskorg. Det stora antalet incidenter där fyrverkerier har använts återspeglar förmodligen det faktum att det är de brinnande metallsalterna som ger fyrverkeripjäsen dess spektra som bidrar ytterligare till att öka HRR i en verklig händelse. Fyrverkerier är även intressant i det avseendet att de kan antända flera olika objekt.

7 Slutsatser

Denna rapport visar temperaturförlopp, HRR, beräknad strålning och en uppskattning av vilka objekt som kan antändas av drivraketen i normalstora fyrverkeripjäser. Ingen hänsyn har tagits till de kringflygande gnistor/metallsplitterna. Försöken uppvisar relativt bra repeterbarhet. Avgiven strålning och temperatur ökar med fyrverkeripjäsens storlek. Uppmätt temperatur, speciellt på kopparplattan och det mantlade termoelementet, varierar med avståndet från fyrverkeripjäsens explosionsdel till kopparplattan. Om raketen befunnit sig i direkt kontakt mot kopparplattan hade den fått en högre temperatur. Med tanke på detta så är ju resultatet att betrakta som icke konservativt. Under försöken genomfördes ett test där avståndet från fyrverkeripjäsens drivningsdel till kopparplattan minskades från 27 till 22 cm. Samtliga termoelement, förutom kopparplattan, uppvisade då högre temperaturer. Det är lite oväntat att samtliga termoelement uppvisar en högre temperatur då ett flertal av dem, bl.a. de vilka är svetsade på det perforerade röret eller hänger fritt i luften, fortfarande befinner sig på samma radie i alla försöken. Därför är det svårt att dra en exakt slutsats efter enbart ett utfört försök med kortare pinne utan försöken visar endast på den variation mellan försöken som uppstår då gnistor etc. tar olika väg i olika försök.

Termoelementen svetsade på konen och det perforerade röret visade endast en marginell temperaturökning oberoende vilken fyrverkeripjäs som testades p.g.a. tjockleken av material i riggen. Ett tunnare material hade givit högre temperaturer men riskerat riggens stabilitet.

I försöken för Eclipse användes två kopparplattor med varierande emissivitet. För test 1 och test 2 användes en kopparplatta utan beläggning (emissivitet för koppar med oxidlager är 0.78 och 0.02 utan oxidlager) och för test 3 användes en kopparplatta belagd med svart färg (emissivitet approximeras till ett). Teoretiskt bör en varierande emissivitet påverka kopparplattans uppmätta temperatur. För Eclipse testserie uppvisar dock emissiviteten en marginell påverkan av uppmätt temperatur. Skillnaderna i temperatur mellan test 1 och test 2 är i samma storleksordning som skillnaden mellan test 3 och test 2, se Figur 23

Under båda försöken för Nova och försök ett för MegaTwin föll restprodukter av fyrverkeripjäsen ner på kopparplattan och brann ut under ett antal sekunder (30-94). För MegaTwin sågs detta via en höjd koppartemperatur, dock var avsvlningsfasen likvärdig med övriga försök. För Nova uppvisade det mantlade termoelementet högre temperaturer under längre tid för det försöket som brinner längst. Novas kopparplatta visade lägre temperatur för detta försök. Det är tänkbart att dessa nedfallande brinnande restprodukter kan antända andra material och sprida branden.

Den totala strålningen till kopparplattan, 20- 110 kW/m², beräknas genom att ta hänsyn till konvektions och strålningsförluster. HRR, 20-100 kW, beräknas genom att anta att strålningen utgår från en punktkälla som strålar ut över en hel sfär med radien 27 cm. Den beräknade HRR för fyrverkerier, 20-100 kW, är i samma storleksordning som en liten papperskorg. Det stora antalet incidenter där fyrverkerier har använts återspeglar förmodligen det faktum att det är de brinnande metallsalterna som ger fyrverkeripjäsen dess spektra som bidrar ytterligare till att öka HRR i en verklig händelse. Fyrverkerier är även intressant i det avseendet att de kan antända flera olika objekt.

I rapporten har hänsyn tagits till termiskt tunna och halvoändliga material. I båda fallen antas en konstant strålningspåverkan. Det är svårt att med exakt säkerhet säga vilka material som antänds då detta beror på en rad omständigheter som t.ex. materialets

fukthalt, lokaliserat värmefflöde och ytbehandling. En del möbler i skolor, t.ex. stoppade stolar och soffor, består av ett tygmateriale ovanpå ett isolerande materiale. Dessa möbler kräver liten infallande energi för att antändas.

En jämförelse av beräknade yttemperaturer med antändningstemperaturer från Tabell 21 ger att materiale som papper, tyg, trä och plast kan antändas. Resultaten mellan termiskt tunna och halvoändliga materiale stämmer relativt väl överens med varandra. Detta bekräftas även av försök gjorda i konkalorimeter med liknande strålningsnivåer. Det är värt att notera att ovan beräkningar endast tar hänsyn till fyrverkeripjäsen och inte hur branden skulle kunna tänkas spridas. Räddningstjänsten Syd visar t.ex. att ett wellpapp kan antändas av flammorna från en fyrverkeripjäsa och sedan sprida branden till en trälåda.

Den lösa inredningen (gardiner, möbler etc.) utgör en stor del av brandbelastningen i ett rum och brandkraven är tyvärr mycket låga om ens några för dessa. Mycket skulle vara vunnet om brandkrav infördes på dessa.

SBI är den metod som används för att klassificera byggnadsmateriale som används som ytskikt. De strålningsnivåer som används i SBI ligger i samma storleksordning som de här uppmätta 27 cm från drivningsraketerna. Dock sker exponeringen i SBI över en längre tid än vad en raket ger, men ett SBI-resultat skulle ändå kunna ge en fingervisning om ett materials beteende när det utsätts för drivningen från en raket. SBI gäller dock bara fasta materiale och ytskikt, d.v.s. ej möbler eller textilier.

En annan viktig provningsmetod är konkalorimetern. I denna kan strålningsnivån varieras mellan 0-100 kW/m², dvs. i samma storleksordning som den av raketerna utvecklade värmepåverkan och metoden utgör därför ett viktigt verktyg vid provning av olika materiale. Det finns även ett beräkningsprogram framtaget för att beräkna ett materials beteende i SBI och Room Corner test baserat på resultaten från konkalorimetern.

Avslutningsvis kan sägas att beräknade strålningsnivåer och HRR i rapporten endast gäller för relativt små fyrverkeripjäser som är förhållandevis lätta att få in genom t.ex. brevinkast. För större pjäser kommer kan HRR och framförallt metallsalterna öka avseendevärt.

8 Referenser

- ¹ Blomqvist, P., Johansson, H., Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand, SP rapport 2008:48, Borås, 2009
- ² van Hees, P. Johansson, N., Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor?, Rapport 3148. Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2010
- ³ Klason, L.G., Johansson, N., Andersson, P., Dimensionerande brand: anlagda skolbränder, SP Rapport 2010:15, Borås, 2010
- ⁴ Donner, J., A Professional's Guide to Pyrotechnics: Understanding and Making Exploding Fireworks, 1997
- ⁵ Babrauskas, V., Ignition Handbook, 2003
- ⁶ P & K, Fyrverkerier och miljön, en faktskrift från Plast- & Kemiföretagen
- ⁷ Thornton, W., "The relationship of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds," Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917
- ⁸ Hermodsson, T., Wickström, U., Modification of the plate thermometer – Proving tests at SP and WFCR, SP Report 1997:32, 1997
- ⁹ Hottel, H.C., McAdams, W.H., Heat Transmissions, 1954
- ¹⁰ Quintiere, J. *Ignition of Solids*, 2006
- ¹¹ Drysdale, D. *An Introduction to Fire Dynamics*, Chichester: John Wiley & Sons, 1998
- ¹² Analytisk lösning av värmeledningsekvationen, Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, 1990
- ¹³ Utdelat material ur kursen VBR022 Brandkemi och explosioner, LTH, Lund, föreläsning 1
- ¹⁴ Van Hees, P., Adl-Zarrabi, B., diskussion om värmeledningstalet, 2010
- ¹⁵ Formelsamling Brandkemi, Institutionen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, 2009
- ¹⁶ SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, 2002
- ¹⁷ Holman, J. P., Heat Transfer, 1976
- ¹⁸ Räddningstjänsten Syd, Beskrivning av brandförsök med fyrverkeripjäser vid räddningstjänsten syd i Lund, 2009
- ¹⁹ Sundström, B., Olander, M., et al, An Approach to Fire Safety Design for Furnitures and Fittings, SFPE Conference 16-18 June 2010
- ²⁰ ISO 5660-1, Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), ISO, Second edition 2002-12-15
- ²¹ Johansson, P. diskussion om ISO 5660, 2010
- ²² Babrauskas, V., Parker, W. J., Ignitability Measurements with the Cone Calorimeter, Fire and Materials, Vol. 11, 31-43, 1987
- ²³ EN 13823, Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings - exposed to the thermal attack by a single burning item, CEN, February 2002
- ²⁴ Van Mierlo, R.J.M. (1998) Development of the SBI test method (Volume 1), TNO Report 98CVBR1067, Delft: TNO Building and Construction Research.
- ²⁵ Van Hees, P., Andersson, P., Hjøhlman M., Use of the Cone Calorimeter and ConeTools software for development of innovative intumescent graphite systems, Fire and Materials, Vol. 34, 367-384, 2010

Bilaga 1, Bilder från försöken



Försök 1, Eclipse 1



Försök 2, Eclipse 2



Försök 3, Eclipse 3 Cu-platta
är från detta försök och framåt
belagd med svart färg



Försök 4, Apollo 1



Försök 5, Apollo 2



Försök 6, MegaTwin 1



Försök 7, MegaTwin 2



Försök 8, MegaTwin 3



Försök 9, Nova 1



Försök 10, Nova 2