

Fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet

– en studie i fyrverkerisäkerhet och testmetodik

Joakim Mattsson, Jonas Mårtensson

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

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

Rapport 5409, Lund 2012

Vältande fyrverkeritårter
– En studie i fyrverkerisäkerhet och testmetodik

Joakim Mattsson, Jonas Mårtensson

Lund 2012

Titel/Title

Vältande fyrverkeritårter – en studie i fyrverkerisäkerhet och testmetodik.
Tip-over tendency of multiple tube fireworks.

Rapport/report: 5409**ISSN: 1402-3504****ISRN: LUTVDG/TVBB-5409-SE****Antal sidor/Number of pages**

48

Författare/Authors

Joakim Mattsson, Jonas Mårtensson

Nyckelord

Beräkningsmodell, brandrisk, fyrverkerier, fyrverkeritårta, fyrverkerisäkerhet, försöksuppställning, Interactive Physics, känslighetsanalys, mekanik, olycksstatistik, pionjärbete, praktiska försök, skademönster, standardisering, testmetod. testmetodik, tyngdpunkt, vältfaktor, vältningsbenägenhet.

Keywords

Accident statistics, calculation model, center of gravity, experimental setup, experimental test, fireworks, firework battery, firework safety, injury patterns, Interactive Physics, sensitivity analysis, pioneering work, fire risk, standardization, test method, tip-over, tip-over factor, tip-over tendency.

Bilder/Pictures

Samtliga bilder är tagna av författarna, om inte annan källa anges.
All photos are taken by the authors, unless another source is stated.

Abstract

This report is a study in fireworks safety with emphasis on the safety issues considering multiple tube devices. The report was produced in order to facilitate the examination of the risks of firework cakes tipping over during firing, as well as providing support for future studies. The availability of detailed Swedish statistics regarding accidents involving fireworks has proven to be deficient, so foreign statistics must be taken into consideration. The report proposes a method for testing the tip-over propensity of multiple tube devices that can be used as a tool for classification of new products. The method in its current form should be considered as the foundation in a developing and validation process that could lead to a standardized test method for testing the tip-over propensity of multiple tube devices.

Författarna ansvarar för innehållet i rapporten

© Copyright: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet,
Lund 2012.

Brandteknik och Riskhantering

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 Lund

Department of Fire Safety Engineering

and Systems Safety

Lund University

P.O. Box 118

SE-221 00 Lund

Sweden

Sammanfattning

Denna rapport utgör en fördjupad studie av säkerheten kring fyrverkeritårtor. Rapporten är framtagen i syfte att underlätta undersökningen av riskerna med att fyrverkeritårtor välter vid avfyrning, samt att ge stöd för framtida studier.

Tillgången på mer detaljerad svensk olycksstatistik gällande fyrverkerier har visat sig vara knapphändig, varför utländsk statistik måste tas i beaktning vid kartläggning av skademönster fördelat på typ av fyrverkeripjä. Fyrverkeritårtors skadepotential är stor eftersom de normalt innehåller många skott och dessutom inte går att stoppa när de väl antänts. Dock är andelen skador som orsakas av fyrverkeritårtor förhållandevis liten, men amerikansk statistik visar att fyrverkeritårtor är överrepresenterade vad gäller åsamkande av allvarligare skador.

Olycksstatistiken i kombination med de rapporter som finns kring fyrverkerirelaterade olyckor pekar på att det framförallt är handhavandefel som är huvudorsaken till de flesta av olyckorna. I rapporten läggs dock fokus på identifiering av vilka faktorer som orsakar vältning i de fall då rekommendationerna för handhavande följs.

I rapporten föreslås en metod för testning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet, som kan användas som verktyg vid exempelvis godkännande och klassificering av nya produkter. Metoden bygger på beräkningar och enklare mätningar snarare än statistiska mängdförsök som kräver att ett stort antal exemplar testas. Beräkningsmodellen, som framtagits som en del av denna testmetod, behandlar vältning i det särskilda fall då en fyrverkeritårta placeras på horisontellt, hårt och ojämnt underlag. Rekylkraften är den enda parameter som kräver mätning vid användning av denna testmetod. De försök som genomförts visar på att mycket snabb mätutrustning krävs för att användbara mätresultat ska kunna erhållas.

Metoden i dess nuvarande form ska ses som grundstommen i en utvecklings- och valideringsprocess som kan leda fram till en standardiserad testmetod för fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet, med tillhörande gränsvärden för godkännande och klassificering. Dock anses vidareutveckling och validering av metoden vara nödvändig innan standardisering är möjlig.

Summary

This report is a study in fireworks safety with emphasis on the safety issues considering multiple tube devices. The report was produced in order to facilitate the examination of the risks of firework cakes tipping over during firing, as well as providing support for future studies.

The availability of detailed Swedish statistics regarding accidents involving fireworks has proven to be deficient, so foreign statistics must be taken into consideration. The damage potential of multiple tube devices is great since they normally contain several shots and since they cannot be stopped once they are ignited. Although the proportion of injuries caused by fireworks cakes are relatively small, American data shows that the multiple tube devices are over-represented among accidents causing serious injuries.

Accident statistics along with available reports on fireworks-related accidents indicate that operating error is the main cause of most accidents. In this report, however, focus is added on identifying the factors that cause tip-over in those cases where the handling safety recommendations are followed.

The report proposes a method for testing the tip-over propensity of multiple tube devices that can be used as a tool for classification of new products. The method is based on calculations and simple measurements rather than statistical tests that require a large number of specimens tested. The analytical model, which was proposed as part of the test method, treats tip-over in the specific case of a multiple tube device placed on a horizontal, hard and uneven surface. The recoil force is the only parameter that requires measurement when using this test method. The tests carried out show that advanced equipment is required in order to obtain usable measurements.

The method in its current form should be considered as the foundation in a developing and validation process that could lead to a standardized test method for testing the tip-over propensity of multiple tube devices. However, further development and validation of the method may be necessary before standardization is possible.

Förord

Detta examensarbete utgör författarnas sista milstolpe på brandingenjörsprogrammet. Arbetet har sträckt sig över en hösttermin och varit utmanande och spännande, även om det ibland varit tufft och krävande och ljuset i tunneln känts långt borta. Författarna är djupt tacksamma och imponerade över det engagemang som visats från de personer som hjälpt oss med information, utrustning och arbetet över lag.

Vi vill tacka alla som hjälpt oss i processen med detta pionjärbete, utan ert stöd hade det inte gått!

Stefan Svensson
MSB

Rolf Weinander
MSB

Sven-Ingvar Granemark
Brandteknik LTH

Shulin Nie
MSB

Berit Andersson
Brandteknik LTH

Kristian Stålné
Byggnadsmekanik LTH

Per Johan Gustafsson
Byggnadsmekanik LTH

Anders Sjöström
Teknisk Akustik LTH

Tomas Jansson
Elektrisk Mätteknik LTH

Sven-Inge Möller
Förbränningsfysik Lunds Universitet

Reine Adolfsson
FOI

Dan Martelin
FOI

Lund 2012

Joakim och Jonas

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
1.4 Metod	2
2 Förstudie.....	5
2.1 Olycksstatistik	5
2.1.1 Beaktande av utländsk statistik	5
2.1.2 Tidpunkt för användande.....	5
2.1.3 Kön	6
2.1.4 Ålder.....	7
2.1.5 Typ av skada.....	8
2.1.6 Typ av fyrverkeripjäs	8
2.1.7 Bränder orsakade av fyrverkerier	9
2.2 Fyrverkerier	11
2.2.1 Kemikalier och kemiska processer	11
2.2.2 Fyrverkeritårtor	12
2.3 Säkerhet och regler.....	13
2.3.1 Förutsättningar för en säker fyrverkeritårta.....	13
2.4 Brandrisk	15
2.5 Uppmärksammade fall	16
3 Utvärdering av förstudie.....	19
4 Försök.....	21
4.1 Val av försöksupställningar.....	21
4.1.1 Möjliga försöksupställningar.....	21
4.1.2 Urvalsprocess	22
4.1.3 Valda försöksupställningar	23
4.2 Praktiska försök.....	24
4.2.1 Försöksomgång 1	24
4.2.2 Försöksomgång 2	27
5 Beräkningsmodell.....	31
5.1 Ingående parametrar	31
5.2 Beräkningsmodell för vältningsbenägenhet	32
5.3 Ingående parametrars inverkan på vältfaktorn	33
5.3.1 Känslighetsanalys	33

5.3.2 Förflyttning av tyngdpunkt.....	34
5.4 Validering av beräkningsmodellen.....	34
6 Slutligt resultat	37
7 Diskussion	39
7.1 Olycksstatistik	39
7.2 Bortvalda försöksuppställningar.....	39
7.3 Praktiska försök.....	39
7.4 Beräkningsmodell.....	40
8 Slutsats	43
9 Förslag till fortsatta studier.....	45
10 Referenser.....	47
Bilaga A Klassificering av fyrverkerier	
Bilaga B Testade tårtors konstruktion	
Bilaga C Resultat från försök	
Bilaga D Fullständig beräkningsmodell	

1 Inledning

I detta inledande kapitel presenteras studiens bakgrund, syfte, mål och metod.

1.1 Bakgrund

Säkerheten kring fyrverkerier är och förblir en högst aktuell fråga eftersom ett stort antal människor varje år råkar ut för olyckor i samband med hantering av dessa. Åsikterna om vad som vanligtvis orsakar fyrverkeriolyckor går isär beroende på vilken part i frågan som får komma till tals, exempelvis trycker tillverkare och återförsäljare på att alkohol och handhavandefel snarare än brister i konstruktionen är den stora boven i frågan. Enligt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, herefter kallad MSB, skadas årligen omkring 200 personer i Sverige, så allvarligt att de tvingas uppsöka sjukvård, och att mellan 150 och 200 bränder årligen orsakas av fyrverkerier (MSB, 2011).

Enligt amerikansk statistik orsakas största andelen olyckor med pyrotekniska artiklar av så kallade tomteblöss och smållare, och endast 5 % av alla fyrverkerirelaterade kroppsskador i USA år 2010 orsakades av så kallade *multiple tube devices*, det vill säga fyrverkeritårtor (Hall, 2012). Trots att denna typ av fyrverkeripjäser orsakar en relativt liten del av de fyrverkerirelaterade olyckorna är det lätt att spekulera kring vilka konsekvenser en antänd och omkullvält fyrverkeritårta kan medföra.

Rapporterna om fyrverkerirelaterade olyckor är många och vittnar om flertalet allvarliga skador och även dödsfall. Inte minst har på senare år problematiken kring fyrverkeritårtor uppmärksamats, eftersom olycksrapporter klargjort att det finns återkommande problem med säkerheten kring dessa. Ofta handlar det om vältning i samband med avfyrning, då pjäsen placerats på instabilt underlag.

Eftersom avfyrningen inte går att stoppa när antändning väl har skett, och eftersom det finns enheter med ett stort antal skott att tillgå på marknaden, är det lätt att dra slutsatsen att olycksrisken är hög när en sådan enhet väl välter. Skotten, som skjuts ut med relativt hög utgångshastighet och brinner med mycket hög temperatur när de exploderar, kommer i ett sådant fall att gå okontrollerat längs marken varpå risken för brand och personskador är uppenbar. Det är dessutom svårt för åskådare att söka skydd eftersom det är omöjligt att förutsäga vart skotten kommer ta vägen, samtidigt som fyrverkeritårtan kommer att röra sig på ett oberäkneligt sätt under avfyrningen (MSB, 2010 A).

Frågan har de senaste åren kommit att diskuteras så högt upp som i EU-kommissionen, där MSB har skrivit en formell invändning mot ett förslag till en ny Europastandard för provning och godkännande av fyrverkeriartiklar. I standarden direktivet föreslås att fyrverkeritårtor som kräver nedgrävning eller förankring för att stå upprätt under avfyrning godkänns. Eftersom marken på många håll i Norra Europa är frusen vid de tidpunkter då fyrverkerier används som mest, det vill säga i nyårstider, är detta en anvisning som i många fall är svår eller rentav omöjlig att följa. Gemene man förväntar sig dessutom inte att en fyrverkeripjäs kommer välta om den klarar av att stå upprätt och stabilt innan avfyrning. Tillverkaren fransäger sig allt ansvar om användaren inte följer anvisningen på förpackningen, och om det inte finns möjlighet till nedgrävning eller förankring i de fall detta krävs skall användaren lämna fyrverkeripjäsen oanvänd. MSB anser att det är högst osannolikt att denna anvisning kommer följas (MSB, 2010 A).

Men det är inte bara frusen mark som innebär problem ur säkerhetssynpunkt. En orsak till varför fyrverkeritårtor välter kan också vara att de placeras på underlag där stabiliteten inte är tillräcklig för att möjliggöra säker avfyrning. Exempelvis kan en snödriva vara förrädisk i detta avseende.

I Sverige är i dagsläget tillgången på detaljerad olycksstatistik gällande fyrverkerier bristfällig, särskilt vad gäller ett smalt område som vältande fyrverkeritårtor. Önskemål har därför funnits från MSB att vidare studier görs över vilken typ av statistik som finns tillgänglig utanför Sveriges gränser. Ett projekt drivs i skrivande stund av MSB för att insamla statistik angående skador från fyrverkerier från akutmottagningar runt om i landet. På grund av otillräcklig mängd insamlad data har denna undersökning inte färdigställts, men förhoppningen är att den kan presenteras under 2013¹.

På senare tid har även behovet av allt mer noggranna testmetoder för godkännande av fyrverkeritårtor uppmärksammats, samt vikten av att effektivt insamla information och statistik gällande de olyckor och skador de åsamkar. Det är detta behov som lett fram till denna studie om vältande fyrverkeritårtor.

1.2 Syfte

Syftet med studien är att underlätta undersökningen av riskerna med att fyrverkeritårtor välter vid avfyrning, samt att ge stöd för framtida studier och eventuellt även beslutsstöd.

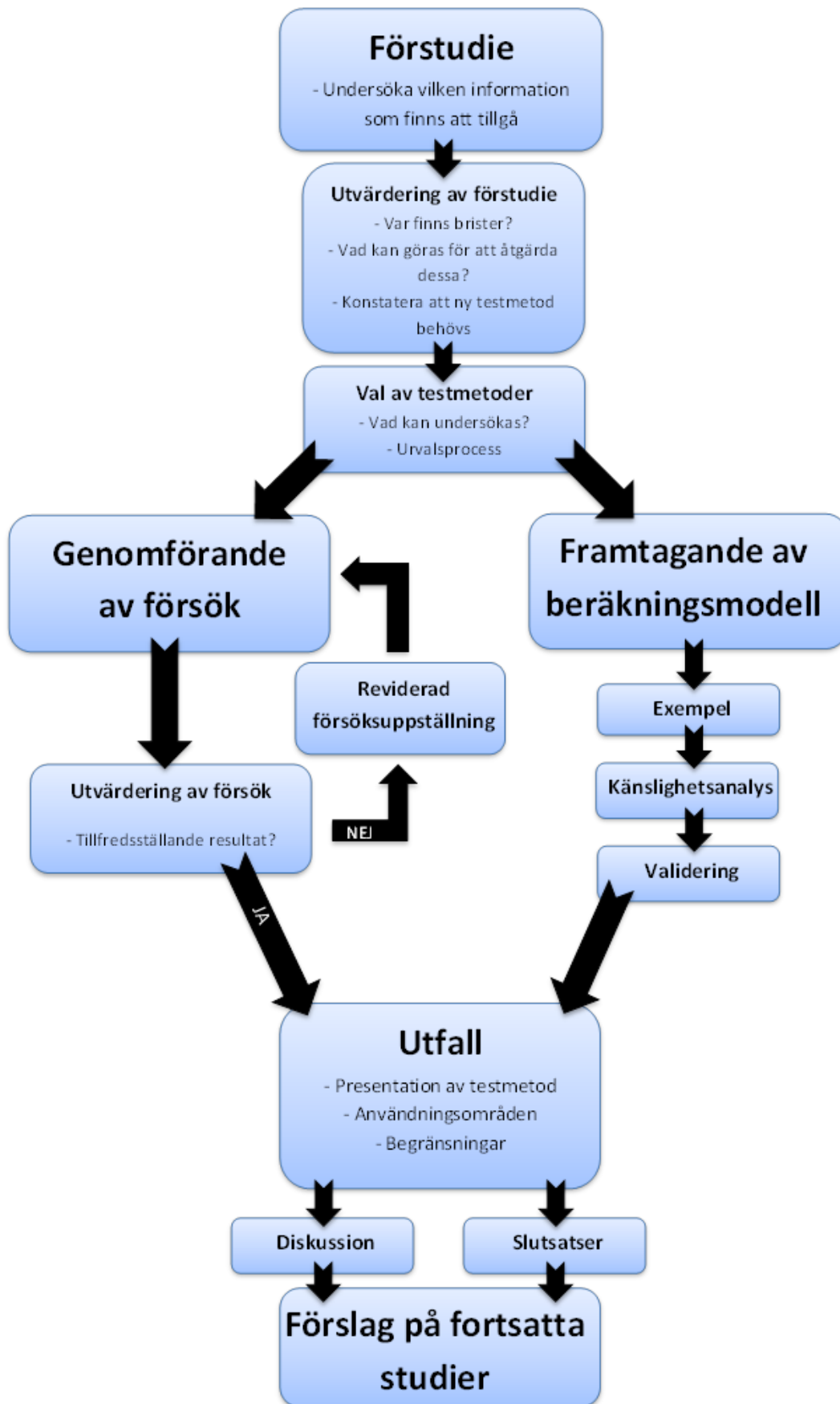
1.3 Mål

Målet med examensarbetet är att ta fram och utvärdera en testmetod för undersökning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet, eftersom det i dagsläget inte finns någon. Arbetet ska även resultera i en överblick av vilken information som finns tillgänglig på området.

1.4 Metod

Arbetet med studien har följt en arbetsgång som illustreras i figur 1.

¹ Kontakt per e-post med Mikael Ekeberg, MSB. 2012-10-31.



Figur 1 – Överblick av arbetsgången som tillämpats i studien.

2 Förstudie

I detta kapitel presenteras den förstudie som gjorts, i syfte att ge en tydligare bild av den problematik som råder kring fyrverkerier och dess skadepotential på människor och omgivning. Förstudien utgör i grund och botten en litteraturstudie, i vilken det undersökts vad som tidigare funnits skrivet inom området. Förstudien inriktas både på undersökning av problemet med fyrverkeritårtor, men också på problematiken kring fyrverkerier i allmänhet. Detta eftersom tillgängligt material gällande fyrverkeritårtor som enskild olycksorsak i flera avseenden visat sig vara knapphändig.

I förstudien tas problematiken kring fyrverkerier upp med utgångspunkt på statistik och rapporteringar om tidigare olyckor. Säkerheten kring fyrverkerier och fyrverkeritårtor tas upp med utgångspunkt på funktion och vad som gör att en fyrverkeripjäs kan bedömas som säker, samt hur godkännandeprocessen av fyrverkeriartiklar ser ut.

2.1 Olycksstatistik

I detta avsnitt presenteras statistik över fyrverkerirelaterade olyckor fördelat på bland annat ålder, typ av skada, typ av fyrverkeripjäs, bränder orsakade av fyrverkerier med mera.

2.1.1 Beaktande av utländsk statistik

I Sverige har statistik kring fyrverkerirelaterade olyckor i många avseenden visat sig vara bristfällig, varför inhämtande av information från andra länder har varit nödvändig för att kunna belysa den problematik som råder.

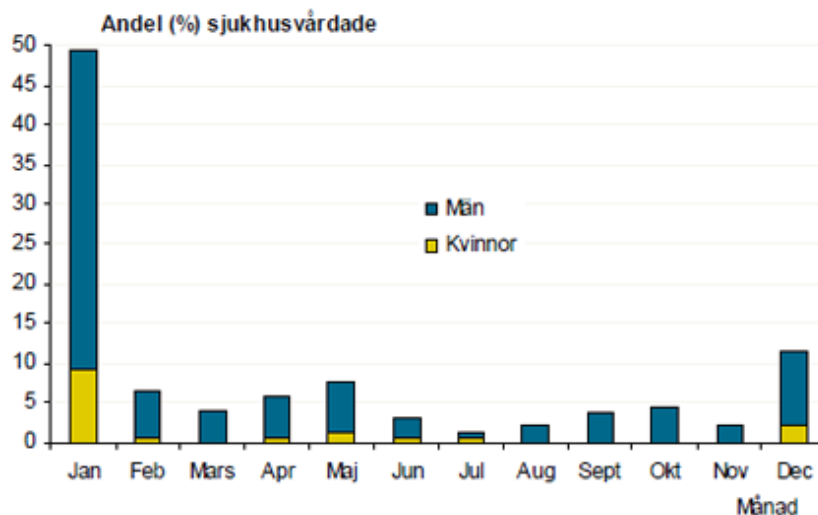
Viktigt att beakta när olycksstatistik från andra länder studeras är att traditioner ser olika ut beroende på vilket land som betraktas, framförallt när det kommer till tradition och tidpunkt för användande. Trots dessa skillnader görs i denna rapport antagandet att åldersfördelningen vad gäller handhavande av fyrverkerier kan likställas, det vill säga att handhavandemönstret ser likadant ut oavsett vid vilken högtid eller tidpunkt på året fyrverkerierna används. Detta för att möjliggöra jämförelse av olycksstatistik från olika länder, och för att i rapporten kunna dra slutsatser av denna statistik.

I Sverige används merparten av alla fyrverkerier under nyårsperioden, medan användningen i USA är störst i samband med firandet av självständighetsdagen den 4:e juli. 73 % av alla fyrverkerirelaterade olyckor i USA år 2010 skedde under perioden mellan 18:e juni till 18:e juli (U.S. Fire Administration, 2011). I Storbritannien är användandet emellertid som störst kring den 5:e november i samband med firande av Guy Fawkes Night, även kallad Bonfire Night. En viktig aspekt som därför måste beaktas, när man ser till skillnaderna i tidpunkt under året, är att förutsättningarna för säkert användande kan se olika ut beroende på årstid och klimat.

Vintermånader i nordnorden erbjuder helt andra förutsättningar än amerikansk högsommar. Exempelvis kan frusen mark göra det mycket svårt att förankra fyrverkeripjäser i de fall detta krävs, och snödrivor kan utgöra förrädiskt underlag då stabiliteten ofta inte är tillräcklig. Samtidigt innebär en varm och torr sommar en betydligt ökad risk för gräs- och skogsbränder i jämförelse med motsvarande olycksrisk vintertid.

2.1.2 Tidpunkt för användande

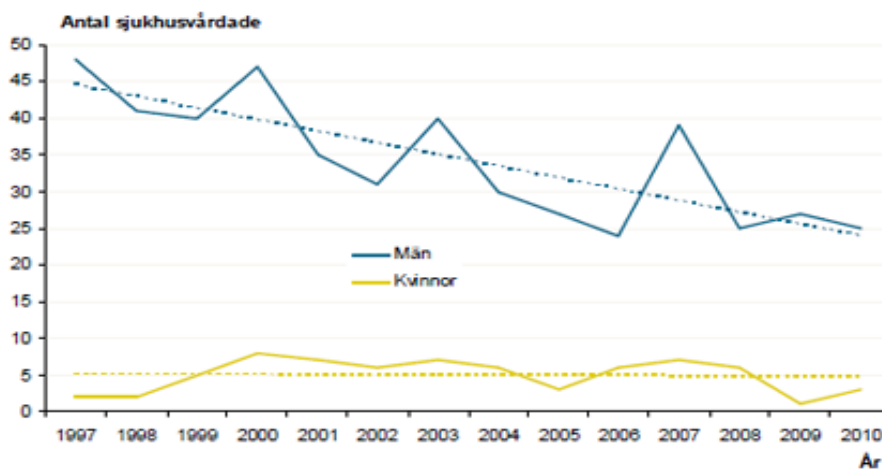
En stor del av alla fyrverkerirelaterade olyckor i Sverige med vård av patient på sjukhus som följd sker av förklarliga skäl i januari, i samband med nyårsfirande (MSB, 2011). Detta illustreras i figur 2.



Figur 2 – Andel sjukhusvårdade i procent 2004 - 2010 till följd av fyrverkeriolyckor, fördelat efter inskrivningsmånad och kön (MSB, 2011).

2.1.3 Kön

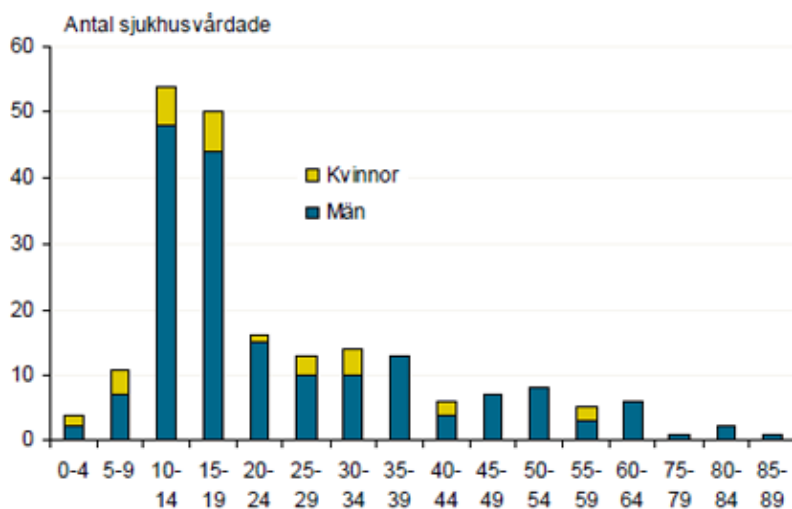
I Sverige skadas årligen omkring 200 personer så allvarligt att de tvingas uppsöka akutmottagning (MSB, 2011). Figur 3 visar antalet personer som skadades så pass allvarligt under perioden 1997 till 2010 att de behövde fortsatt sjukhusvård och lades in på sjukhus i minst 24 timmar. Trenden har de senaste åren varit att antalet allvarliga olyckor minskat bland männen i Sverige medan siffran är relativt oförändrad bland kvinnorna, dock är män överrepresenterade överlag.



Figur 3 – Antal sjukhusvårdade 1997 - 2010 till följd av fyrverkeriolyckor fördelat på kön (MSB, 2011).

2.1.4 Ålder

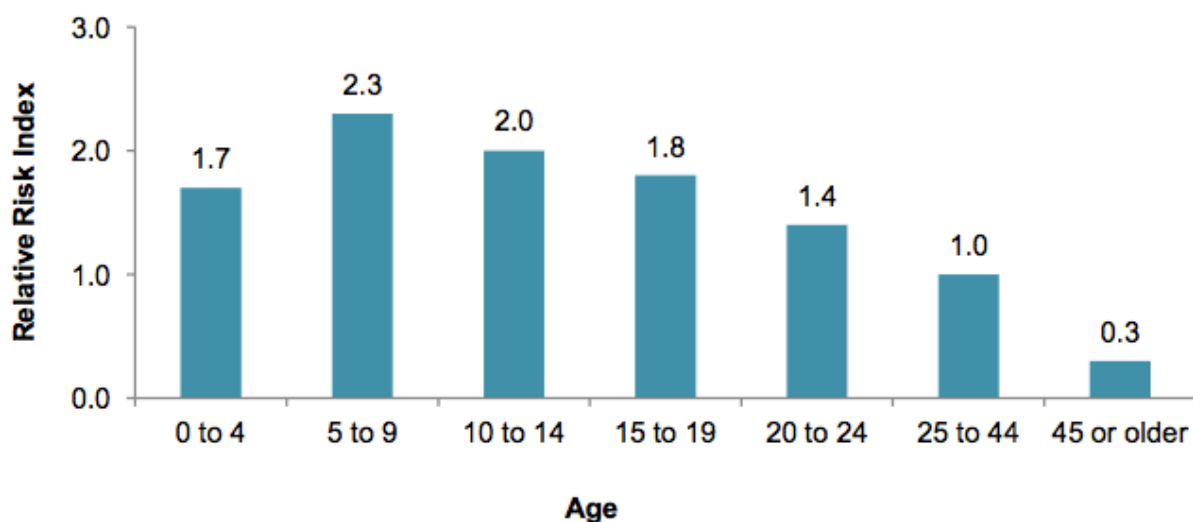
Figur 4 visar att den största delen av de som i Sverige skadas så pass allvarligt i samband med användande av fyrverkerier att de måste vårdas på sjukhus är pojkar i åldern 10 – 19 år (MSB, 2011).



Figur 4 – Antal sjukhusvårdade 2004 - 2010 till följd av fyrverkeriolyckor fördelat på åldersgrupp och kön (MSB, 2011).

En studie som genomförts i Storbritannien visar att 60 % av de som skadades av fyrverkerier under perioden 11:e oktober till 12:e november år 1975 till 2005 var i åldrarna 0 – 16 år (ISD Scotland, 2007). De yngre åldrarna är alltså kraftigt överrepresenterade vad gäller skador orsakade av fyrverkerier.

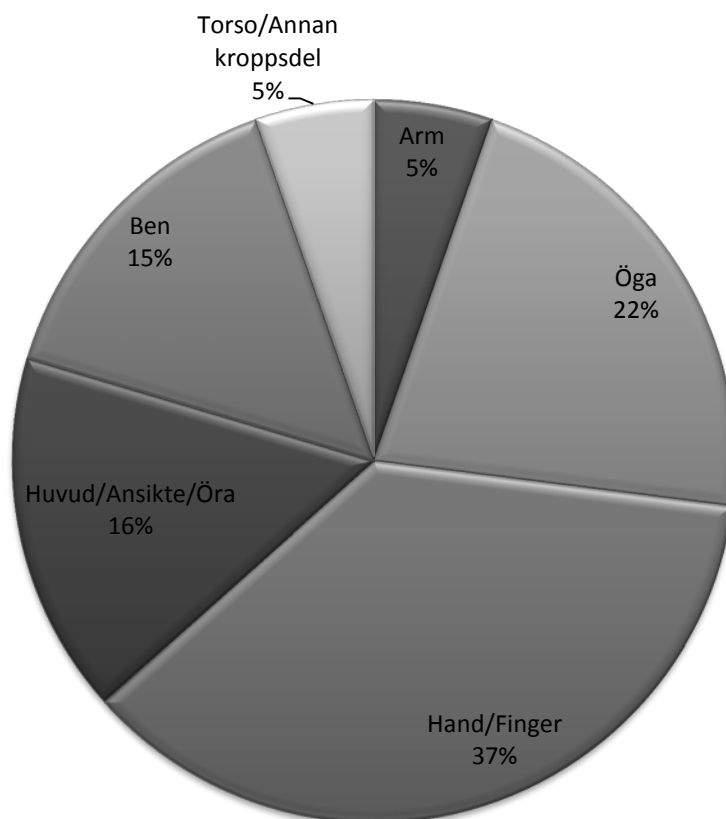
Figur 5 visar relativ risk att skadas av fyrverkerier fördelat på olika åldersgrupper, baserat på olycksstatistik från USA under månaden kring 4:e juli år 2010. Den relativa risken är beräknad som antal fyrverkerirelaterade skador per miljon invånare i respektive åldersgrupp dividerat på antal fyrverkerirelaterade skador per miljon invånare för alla åldersgrupper kombinerat (Hall, 2012). Den relativa risken är 1.0 för alla åldersgrupper kombinerat.



Figur 5 – Relativ risk att skadas av fyrverkerier, fördelat på åldersgrupp (Hall, 2012).

2.1.5 Typ av skada

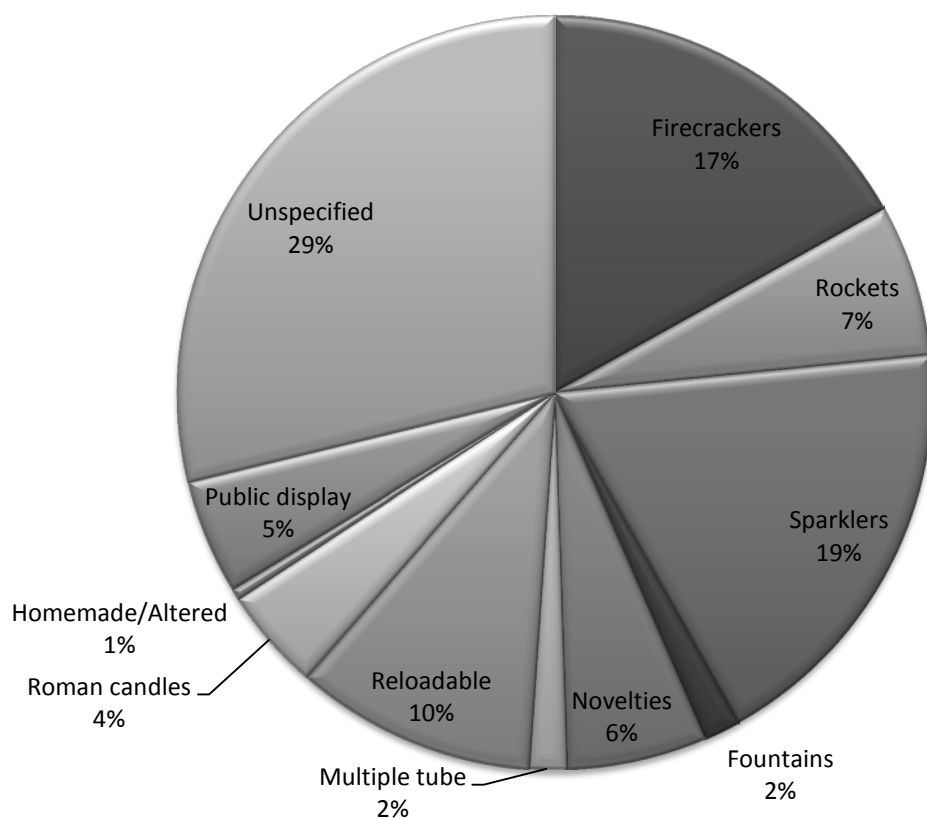
Figur 6 illustrerar de fyrverkerirelaterade skador som uppkommit i USA under perioden 19:e juni till 19:e juli år 2009 till 2011. Diagrammet är en sammanslagning av olycksstatistiken från dessa tre år. Vanligast är skador på huvudet (ansikte, öron, ögon) eftersom detta ofta är helt oskyddat. Vanligt är också skador på händer och fingrar, vilket kan bero på att fyrverkeripjäser ibland hålls i handen eller att försök görs att räta upp en antänd och omkullfallen fyrverkeripjäsa.



Figur 6 – Fyrverkerirelaterade skador fördelade på kroppsdel (Tu och Granados, 2010-2012).

2.1.6 Typ av fyrverkeripjäsa

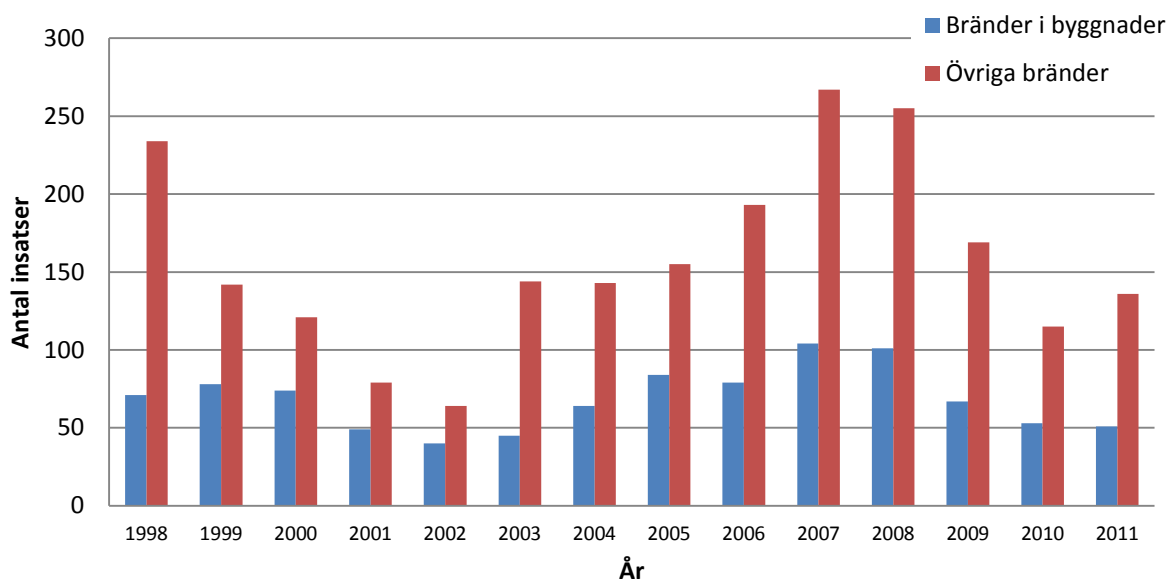
Figur 7 illustrerar hur stor andel av alla fyrverkerirelaterade skador i USA under perioden 19:e juni till 19:e juli år 2009 till 2011 som orsakats av respektive typ av fyrverkeripjäsa. Det kan konstateras att fyrverkeritårtor, i diagrammet *Multiple tube*, orsakar en relativt liten del av alla fyrverkerirelaterade olyckor. Under 2010 orsakades fem procent av alla fyrverkerirelaterade skador av fyrverkeritårtor (Hall, 2012). Dock innehåller fyrverkeritårtor ofta relativt stora mängder pyrotekniskt material, vilket gör att de i likhet med exempelvis romerska ljus och hemmagjorda fyrverkeripjäsa är överrepresenterade vad gäller orsakande av svåra olyckor och dödsfall (Tu och Granados, 2010-2012). Troligtvis ser denna fördelning annorlunda ut i Sverige, då fyrverkeriprodukter med knall som huvudsaklig effekt, det vill säga smällare, är förbjudna. (MSB, 2012 A)



Figur 7 – Andel fyrverkerirelaterade skador fördelat på typ av fyrverkeripjäsa (Tu och Granados, 2010-2012).

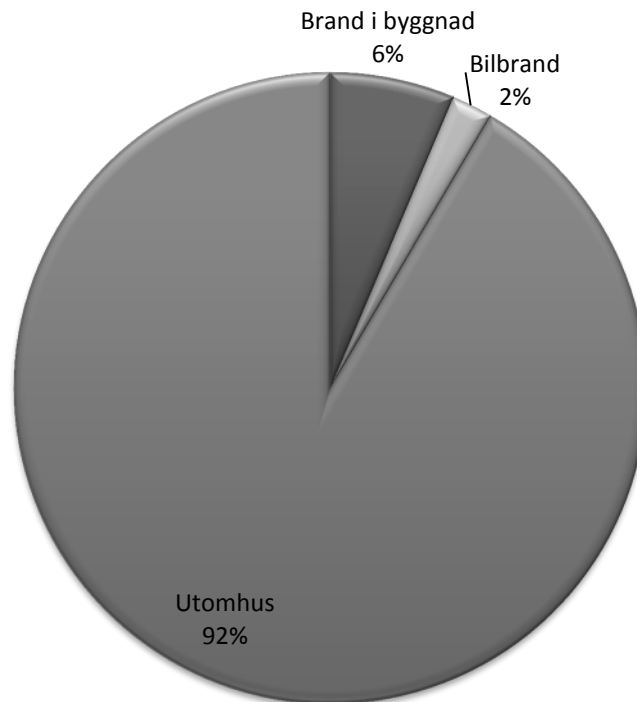
2.1.7 Bränder orsakade av fyrverkerier

Figur 8 visar antalet insatser i Sverige där räddningstjänsten ryckt ut på bränder orsakade av fyrverkerier. Värdena är hämtade från MSB:s kunskapsbank IDA, som bygger på insatsrapporter från Sveriges räddningstjänster.



Figur 8 – Antal bränder i Sverige orsakade av fyrverkerier, fördelat på bränder i byggnader samt övriga bränder (MSB, 2012 B).

Figur 9 visar fyrverkerirelaterade bränder i USA under perioden 2006 till 2010 fördelat på typ av brand. En övervägande del av de fyrverkerirelaterade bränderna ägde rum utomhus, och av dessa utomhusbränder utgjordes 38 % av gräsbränder (Hall, 2012). I detta sammanhang är det emellertid viktigt att ha i åtanke att den största delen av fyrverkerikonsumtionen i USA sker under sommarmånaderna då risken för gräsbrand är som störst, till skillnad från i Sverige där den största fyrverkerikonsumtionen sker vintertid. Dock utgjordes 17 % av alla fyrverkerirelaterade utomhusbränder av bränder i containrar, avfallsbehållare samt andra sopor och avfall (Hall, 2012), och eftersom detta inte är beroende av årstid och klimat kan denna brandriskproblematik också relateras till Sverige och svenska förhållanden.



Figur 9 – Fyrverkerirelaterade bränder fördelat på brand i byggnad, bilbrand samt utomhusbrand (Tu och Granados, 2010-2012).

Under perioden 1980 till 2010 omkom i USA 209 civila personer i bränder orsakade av fyrverkerier. Denna siffra exkluderar de 100 personer som omkom i den uppmärksammade branden på Station Night Club på Rhode Island år 2003 (Hall, 2012).

2.2 Fyrverkerier

Fyrverkerier kan delas in i två klasser – professionella fyrverkeripjäser och fyrverkeripjäser för privat bruk (Klason & Johansson, 2011). Vidare delas fyrverkeripjäserna in i två undergrupper – de som flyger upp i luften och de som stannar kvar på marken (MSB, 2012 A).

De fyrverkeripjäser som flyger upp i luften är, förutom effektladdningen som ger fyrverkeripjäsen dess karaktäristiska effekt och färg, utrustade med en drivladdning som får skottet att flyga upp i luften. De fyrverkeripjäser som stannar kvar på marken saknar denna drivladdning och är endast utrustade med en effektladdning (MSB, 2012 A).

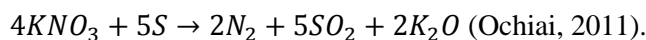
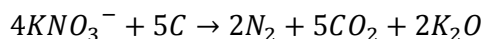
2.2.1 Kemikalier och kemiska processer

Fyrverkeripjäser består normalt sett av tre komponenter – drivladdning, separationsladdning och effektladdning. I detta avsnitt beskrivs dessa tre komponenter, samt de kemiska processer som äger rum när respektive komponent brinner.

2.2.1.1 Drivladdning

Den första komponenten utgör den så kallade drivladdningen, vilken är det som driver skottet upp i luften. Denna laddning består av svartkrut, som i sig är en blandning av kaliumnitrat (KNO_3 , salpeter), svavel (S) samt kol (C). En vanlig fördelning av dessa kemikalier är 75% kaliumnitrat, 10% svavel och 15% kol (Donner, 1997).

När stubintråden brinner av antänds svartkrutet enligt följande förenklade reaktioner:



Det är svaveldioxiden (SO_2) som bildas vid förbränningen av svartkrutet som bidrar till den karaktäristiska doft som infinner sig när fyrverkerier avfyras.

När svartkrutet förbränns frigörs mycket energi som avges i form av värme. Detta leder till att svaveldioxiden, koldioxiden och kvävgasen expanderar till följd av den snabba temperaturökningen, vilket i sin tur skapar en mycket stor tryckökning inuti fyrverkeripjäsen. Det är denna hastiga expansion av gaser som sedan driver skottet upp i luften (Ochiai, 2011).

Förbränningen av svartkrutet i drivladdningen sker som en deflagration, vilket är en förbränningsreaktion där reaktionsfronten propagerar med en hastighet långsammare än ljudets. Detta ger upphov till den mörka men starka knall som hörs när ett skott från exempelvis en fyrverkeritårta skjuts upp i luften. När det gäller raketer bildar förbränningen av svartkrutet istället en jetflamma, som brinner långsammare och driver raketerna uppåt hela sträckan (Russel, 2009).

2.2.1.2 Separationsladdning

Den andra komponenten i fyrverkeripjäsen är laddningen som får själva skottet att brisera när det nått önskad höjd. Denna separationsladdning består vanligtvis av aluminium- eller magnesiumpulver (Al respektive Mg), svavel (S) samt kaliumklorat ($KClO_3$) eller kaliumperklorat ($KClO_4$). Reaktionen sker på liknande sätt som vid förbränningen av svartkrut, men här är det aluminium eller magnesium samt svavel som oxideras, och som oxidationsmedel används kaliumklorat eller kaliumperklorat istället för kaliumnitrat. Reaktionen är starkt exoterm, vilket innebär att mycket energi frigörs i form av värme. Produkterna, i detta fall aluminiumoxid eller magnesiumoxid, kan därför nå temperaturer på nära

3000°C, vilket resulterar i att starkt ljus emitteras. Det är detta ljus som kan ses i det ögonblick laddningen briserar (Ochiai, 2011).

Reaktionen som sker ger upphov till en detonation, vilket innebär att reaktionsfronten propagerar med en hastighet snabbare än ljudets (Russell, 2009). Beroende på separationsladdningens kemiska sammansättning blir detonationen olika stark, en typisk kaliumklorat-aluminiumdetonation propagerar med en hastighet av ca 1300 meter per sekund. Detta att jämföra med sprängämnet TNT (trinitrotoluen) där reaktionsfronten propagerar med så mycket som 4450 meter per sekund (Donner, 1997). Den stora temperaturökningen leder till en snabb uppvärmning och således expanderande av omkringliggande luft, vilket resulterar i den höga knall som hörs när skottet exploderar (Russell, 2009).

2.2.1.3 Effektladdning

Den tredje komponenten utgörs av en så kallad effektladdning, vilket är det som ger fyrverkeripjäsen sin karaktäristiska effekt och färg. Det finns många olika sorters fyrverkeripjäser med avseende på effekt och funktion. De vanligaste sorterna är bengaler, väggsolar, eldbägare, raketer, romerska ljus och fyrverkeritårter (Svea Fireworks, 2012).

Skottet som skjuts iväg upp i luften innehåller en eller flera så kallade stjärnor, vilket kan liknas vid en cylindrisk pellet bestående av en sammansättning av kemikalier som när de förbränns avger ljus i en bestämd våglängd. Stjärnans kemiska sammansättning är avgörande för vilken färg detta ljus får (Russell, 2009).

För att producera röda färg effekter blandas strontiumsalter, exempelvis strontiumkarbonat ($SrCO_3$), med kaliumperklorat, kol och diverse bindnings- och lösningsmedel. På samma sätt används kopparsalter såsom kopparklorid ($CuCl$) för att producera blått ljus, och bariumföreningar såsom bariumklorat ($Ba(ClO_3)_2$) för att ge en grön färg effekt (Russell, 2009).

2.2.2 Fyrverkeritårter

En fyrverkeritårta definieras som en ett montage av fyrverkeripjäser, där samtliga ingående pjäser är seriekopplade med ett enda antändningsställe och där skotten avfyras i en förutbestämd ordning (Svea Fireworks, 2012). Skotten kan vara av varierande karaktär, med flera olika typer av effekter i samma tårta, och med skiftande intervall mellan avfyrningarna.

Varje enskilt bombrör i en fyrverkeritårta har vanligtvis samma konstruktion som ett så kallat romerskt ljus. Karaktäristiskt för romerska ljus är att de är konstruerade av ett långt papprör innehållande upp till sju stycken effektladdningar som avfyras efter varandra, men vanligast för fyrverkeritårter är endast en effektladdning per bombrör (Russell, 2009).

I botten på bombröret sitter en lerplugg med en tjocklek på några centimeter, ovanför vilken drivladdningen, det vill säga svartkrutet, är placerad. Stubintråden löper från utsidan av bombröret in till drivladdningen. Effektladdningen, som kan utgöras av en kula eller en så kallad stjärna, är i sin tur placerad ovanför drivladdningen. Kopplad till effektladdningen sitter en fördröjningsstubin som löper från svartkrutet. I samma ögonblick som drivladdningen briserar antänds också denna fördröjningsstubin, och det är längden på denna som är avgörande för på vilken höjd effektladdningen briserar. Ofta placeras också ett plast- eller papplock ovanför effektladdningen för att göra fyrverkeripjäsen mer motståndskraftig mot fukt (Russell, 2009). För fullständig beskrivning av de fyrverkeritårter som använts vid försöken, se bilaga B.

2.3 Säkerhet och regler

I detta kapitel behandlas fyrverkeritårtor ur ett säkerhetsperspektiv, där faktorer som påverkar en fyrverkeritårtas generella säkerhet presenteras.

2.3.1 Förutsättningar för en säker fyrverkeritårta

En rad förutsättningar måste vara uppfyllda för att en fyrverkeritårta ska kunna bedömas som säker. De mest betydande av dessa förutsättningar är:

- God stabilitet
- God förmåga att motstå fukt
- I övrigt hög tillförlitlighet med avseende på tårtans funktion

2.3.1.1 Stabilitet

Det anses vara allmänt känt att förhållandet mellan tårtans bottenarea, massa och placering av tyngdpunkt är av betydelse för dess benägenhet att välta. En hög fyrverkeritårta med liten bottenarea är av förklarliga skäl mer benägen att välta, och kommer således att kräva en större massa med lägre tyngdpunkt än vad som krävs för en lägre tårta med större bottenarea för att vara säker ur vältnings synpunkt.

2.3.1.2 Fukt

En annan viktig förutsättning för att göra fyrverkeritårtan säker är dess förmåga att motstå fukt. Eftersom tårtan till stora delar är konstruerad av papp, som i sig har stor benägenhet att dra åt sig fukt, är det viktigt att den förvaras torrt. De flesta fyrverkeritårtor är beklädda med någon form av täckande skyddsplast. Fukt som letar sig in i en fyrverkeripjäs kan troligen påverka den så att dess funktion försämras. Ökad fukthalt i det finpulveriserade svartkrutet bör även påverka reaktionshastigheten, till exempel om krutet klumpar sig. Stubinrådets förmåga att brinna bör också försämras genom ökad fukthalt, vilket kan leda till eldsvabrott. Fyrverkeripjäsen blir således oberäknelig och kan utgöra en stor skaderisk.

2.3.1.3 Tillförlitlighet

För att en fyrverkeritårta ska fungera på ett tillförlitligt sätt krävs, precis som beskrivs i avsnitt 2.3.1.2, att den förvaras torrt så att funktionaliteten inte försämras på grund av fukt. Andra krav som ställs på fyrverkeritårtor är att de är utrustade med en så kallad säkerhetsstubin, vilket är en långsamt brinnande stubin som för större fyrverkeritårtor ska ha en brinntid på mellan 7 och 15 sekunder (Räddningsverket, 2006).

Något som är mycket viktigt ur säkerhetssynpunkt är att skotten som skjuts iväg inte briserar på för låg höjd. Detta på grund av den uppenbara skaderisken på människor och egendom en exploderande effektladdning utgör, eftersom brinnande kemikalier slungas iväg med relativt stor kastradie. Vid konstruktion av en fyrverkeritårta är det därför viktigt att kontakten mellan skott och bombrör är lagom avvägd. Är trycket mellan skott och rörets innersida för löst kan det medföra att den expanderande gasen från drivladdningen läcker under avfyrning varpå skottet inte når önskad höjd. Sitter å andra sidan skottet för hårt fast finns risk för att skottet exploderar inuti röret (Russell, 2009).

2.3.1.4 Säkerhetsavstånd

Säkerhetsavståndet för fyrverkeripjäser gäller under förutsättning att pjäsen fungerar felfritt². För fyrverkeritårter är det rekommenderade säkerhetsavståndet direkt proportionellt mot bombrörens innerdiameter, enligt:

$$\text{Säkerhetsavstånd} = 1000 * \text{innerdiameter [m]} \text{ (MSB, 2010 C).}$$

En fyrverkeritårta vars bombrör har en innerdiameter på 50 millimeter kräver således ett säkerhetsavstånd på 50 meter. Detta säkerhetsavstånd tar dock ingen hänsyn till hur långt skotten skjuts iväg, och är alltså ingen indikation på hur nära man som åskådare kan stå för att vara säker då en fyrverkeritårta fallerar och välter.

2.3.1.5 Provning och godkännande

För att en tillverkare ska få släppa ut en pyroteknisk produkt på marknaden krävs det först att denna produkt antingen blir godkänd av MSB (eller dess föregångare Sprängämnesinspektionen och Räddningsverket) eller blir bedömd enligt överensstämmelse med väsentliga säkerhetskrav i EU-direktiv 2007/23/EG och därigenom förses med CE-märkning (MSB, 2010 B).

De provningar som görs för att fastslå om en fyrverkeripjäsa uppfyller de säkerhetskrav som ställs på godkända pyrotekniska produkter, skall genomföras under realistiska förhållanden. Om detta inte är möjligt i laboratorium skall provningarna genomföras under samma förhållanden som råder där fyrverkeripjäsen är avsedd att användas (MSB, 2010 B).

För att en fyrverkeripjäsa ska godkännas måste följande upplysningar och egenskaper beaktas (MSB, 2010 B):

- Konstruktion och karakteristiska egenskaper, inklusive detaljerad kemisk sammansättning (de använda ämnenas vikt och andelar i procent) och dimensioner.
- Den pyrotekniska artikelns fysiska och kemiska stabilitet under alla normala, förutsägbara och miljömässiga förhållanden.
- Känslighet för normal och förutsägbar hantering inklusive transport.
- Förenlighet mellan alla beståndsdelar när det gäller deras kemiska stabilitet.
- Den pyrotekniska artikelns motståndskraft mot fukt, om den är avsedd att användas under fuktiga eller våta förhållanden och om dess säkerhet eller pålitlighet kan påverkas negativt av fukt.
- Motståndskraft mot låga och höga temperaturer, om den pyrotekniska artikeln ska förvaras eller användas vid sådana temperaturer och dess säkerhet eller pålitlighet kan påverkas negativt av nedkylning eller upphettning av en beståndsdel eller av den pyrotekniska artikeln i sin helhet.
- Skyddsanordningar som ska förhindra för tidig eller oavsiktlig initiering eller antändning.
- Lämpliga anvisningar och, om nödvändigt, märkning för säker hantering, förvaring, användning (inklusive säkerhetsavstånd) och destruktion på svenska eller engelska.
- Förmågan hos den pyrotekniska artikeln, dess hölje eller övriga beståndsdelar att motstå åldring under normal, förutsägbar förvaring.
- Specifikation av alla anordningar och tillbehör som krävs samt bruksanvisning för att den pyrotekniska artikeln ska fungera säkert.

² Telefonsamtal med Shulin Nie, MSB. 2012-10-13

Vid provning av pyrotekniska artiklar finns en kategorisering av de typer av fel som kan inträffa. Dessa kategorier är små fel, större fel och kritiska fel, för vilka det finns en definierad gräns för vilken felprocent som är godkänd. Provningsen inleds med att testa tolv exemplar. Beroende på hur många fel som uppstår i respektive kategori blir produkten godkänd, underkänd eller utsatt för omprov, se tabell 1. Vältning av fyrverkeritårta kategoriseras som kritiskt fel, och om de tolv första försöken resulterar i två kritiska fel eller fler blir produkten underkänd. Om ett kritiskt fel upptäcks sker ett omprov med 24 nya exemplar av vilka ingen får uppvisa kritiska fel för att produkten ska bli godkänd. Detta innebär alltså att en produkt kan bli godkänd även om den välter en gång på 36 försök, det vill säga i 2,8 procent av fallen.

Tabell 1 – Nivåer för godkännande av pyrotekniska artiklar (MSB, 2010).

Fel	I första provuttaget			I första och andra provuttaget	
	Godkänt	Omprov	Underkänt	Godkänt	Underkänt
Totalt	högst 3		7 eller flera	högst 8	9 eller flera
varav små,	3	4-6	7	8	9
större,	1	2	3	4	5
kritiska.	0	1	2	1	2

2.3.1.6 Råd för säker användning

I publikationen *10 råd för ett säkrare fyrverkeri* ger MSB förslag på åtgärder som kan öka säkerheten vid handhavande av fyrverkerier. Samma råd återfinns hos många återförsäljare, och återges nedan:

- Kontrollera att fyrverkeripjäsen inte är skadad. Lämna alltid tillbaka skadade pjäser där du köpte dem.
- Förbered ditt fyrverkeri i god tid.
- Var nykter. Alkohol och fyrverkerier hör inte ihop.
- Rigga upp pjäserna enligt bruksanvisningen.
- Håll aldrig en tänd fyrverkeripjäs i handen, om inte bruksanvisningen tillåter det.
- Luta dig aldrig över en tänd fyrverkeripjäs.
- Håll dig på ett behörigt säkerhetsavstånd enligt bruksanvisningen och se till att dina åskådare också gör det.
- Vänta med att gå fram till en fyrverkeripjäs som inte fungerar. Försök aldrig tända igen, om inte bruksanvisningen tillåter det.
- Tänk på riskerna. Fyrverkeripjäser kan orsaka bränder eller andra skador.
- Visa hänsyn. Tänk på att både människor och djur kan bli skrämde av fyrverkerier.

Den största anledningen till att olyckor inträffar i samband med användande av fyrverkerier är att användaren missbedömer tiden mellan antändning och explosion, att man leker eller experimenterar med fyrverkeripjäser eller att fyrverkeripjäsen kastas eller riktas på ett sådant sätt att det inte går att förutse vart effektladdningen kommer ta vägen (MSB, 2011 B). Med andra ord sker de flesta olyckor på grund av handhavandefel, det vill säga när de ovan listade rekommendationerna inte följs.

2.4 Brandrisk

Precis som påpekas i avsnitt 2.1.7 är det inte bara kroppsskador som följd av direktkontakt med fyrverkerier som utgör hela problemet vad gäller risken att skadas vid användning av pyrotekniska artiklar. Statistiken visar att det i Sverige varje år orsakas ett stort antal bränder där brandorsaken uppgetts vara fyrverkerier. Det huvudsakliga problemet med fyrverkerier ur ett brandriskperspektiv är att de kan orsaka stora skador på egendom och natur, med stora konsekvenser som följd. De kan således indirekt även vålla skador på de människor som vistas i de brandhärjade områdena.

Det är enkelt att föreställa sig ett scenario där en omkullvält fyrverkeritårta skjuter iväg skott in i en folksamling med lättantändliga ytterkläder, eller hur ett skott från en sådan tårta letar sig in bland utemöbler på exempelvis en altan. Det finns en uppenbar risk för brännskador på de åskådare vars kläder fattar eld, eller för att brand ska uppstå och spridas till en byggnad i ovan nämnda exempel. Statistik visar också att många fyrverkerirelaterade bränder äger rum utomhus, vanligen i form av gräsbränder eller brand i avfall eller avfallscontainrar.

Det faktum att kemikalierna i en effektladdning från en fyrverkeripjäs brinner med mycket höga temperaturer innebär att fibrösa eller andra lättantändliga material, såsom torrt gräs, utemöbler eller sopor, med hög sannolikhet kan komma att antändas av den stora värmeökning i materialet som ledning och strålning från de flera tusen grader varma brinnande kemikalierna åstadkommer. Figur 10 visar hur en effektladdning från en uppochnervänd fyrverkeritårta briserar och sprider brinnande kemikalier över underlaget.



Figur 10 – Spridning av brinnande kemikalier över underlaget.

De flesta organiska solida material självantänder vid temperaturer på mellan 500-600°C beroende på uppvärmningssätt. För antändning med pilotlåga krävs temperaturer på omkring 300-450°C (SFPE, 2002). Eftersom de temperaturer som nås när kemikalierna brinner överstiger dessa värden med god marginal, är risken för antändning stor. Utöver risken för antändning avger fyrverkerier i regel mycket rök, vilket kan innebära problem vid fyrverkeriolyckor inomhus. Detta åskådliggörs även i figur 10.

2.5 Uppmärksammade fall

För att ytterligare belysa problemet med fyrverkeriers skadeverkan presenteras i detta avsnitt ett urval av händelser som tagits upp i media och som anses vara av stor vikt för förståelsen av vilken omfattning detta problem utgör. Utav fallen som presenteras har inte alla direkt anknytning till just fyrverkeritårtor, men tas ändå upp eftersom de anses representativa för vilken skadeverkan fyrverkeritårtor kan ha.

Nyårsafton 2011, Eslöv

I ett avsnitt av TV-programmet Plus i SVT berättas om en incident där en familjefar blivit träffad i ansiktet av ett skott från en fyrverkeritårta. Dock berodde detta inte på en vält fyrverkeritårta, då tårtan i detta fall hade felfungerat, fallit sönder och skjutit okontrollerat i olika riktningar trots bibehållen

upprätt position. I samband med reportaget filmades försök som gjordes på FOI där en likadan fyrverkeritårta avfyraades på sidan. Tårtan avlossade skott i olika horisontella riktningar tills samtliga skott var avfyraade (SVT, 2012 A; B).

Nyårsafton 2011, Malmö

En 13-årig pojke miste ett ben efter att en fyrverkeripjäs avfyraades mot honom. Pjäsen briserade vid pojkens ben och trasade sönder stora delar av lårmuskulaturen (Sydsvenskan, 2012). På sjukhuset beslutades att skadorna var så pass allvarliga att benet amputerades (Dagens Nyheter, 2012).

December 2011, Kristianstad

En återförsäljare skadades allvarligt i ansiktet och ögat vid en demonstration av en fyrverkeritårta som avfyraades för tidigt på grund av konstruktionsfel. Den så kallade säkerhetsstubinen, som brinner med en centimeter per sekund, hade placerats för nära en snabbstubin, som brinner med cirka tio meter per sekund. Tillverkaren fastställde att ett flertal exemplar av produkten hade felet och produkten återkallades (Kristianstadsbladet, 2011).

Nyårsafton 2010, Hillarp

En man skadades i ansiktet efter att ha blivit träffad av ett skott från en fyrverkeritårta. Mannen och dennes kamrat hade, för att skydda sig från väder och vind, tänt på pjäsen inne i ett uthus och missbedömt brinntiden på stubinen. Tårtan avfyraades inomhus och träffade en av männen i ansiktet, för att sedan fortsätta avfyra ett stort antal skott inomhus med brandskador som följd (Helsingborgs Dagblad, 2010).

Nyårsafton 2008, Skogsby

Två män träffades av skott från en vält fyrverkeritårta. Oklara kroppsskador men sönderbrända kläder (Östran, 2009).

Nyårsafton 2007, Karlskrona

En 16-årig pojke avled efter de allvarliga skullskador han ådrogs efter att ha försökt tända på en större fyrverkeripjäs, som lämnats på ett grönområde av ett festsällskap efter misslyckad avfyraing. Den kraftiga pjäsen hade en skotthöjd på 100 meter och skottet träffade pojken i ansiktet. Pojken avled på sjukhuset några dagar senare (Aftonbladet, 2008 A; B).

Nyårsafton 2001, Motala

En 27-årig man avled efter att ha undersökt en större fyrverkeripjäs som inte avfyraades som förväntat. Pjäsen avfyraades och exploderade i mannens ansikte. Mannen omkom troligen på plats. Samma kväll brännskadades två män i ansiktet i samband med tändning av en fyrverkeritårta (Sveriges Radio, 2002).

Tidigt 1990-tal, USA

I en amerikansk rapport från 1994 beskrivs de två dittills enda kända fallen där åskådare avlidit till följd av en vältande fyrverkeritårta. I det första fallet 1991 avled en treårig pojke efter att ha blivit träffad av skott från en vält fyrverkeritårta. Händelsen ledde till att en utredning av fyrverkeritårtors säkerhet tillsattes, tillverkaren återkallade produkten och en enkel testmetod togs fram. Denna testmetod bestod av att simulera ojämnt underlag med en två tum tjock polyuretanstoppning och helt enkelt undersöka vilka tårtor som välte och inte. Det andra fallet gällde en 65-årig kvinna som 1992 blev träffad i tinningen och ögat av ett skott från en vält fyrverkeritårta och fick så pass svåra skador att hon omkom. Utredningen visade att förloppet varit snarlikt det första fallet. Vid det här laget hade ett flertal tillverkare dragit in flera produkter efter hand som utredningen visade på ökad risk för vältning hos vissa produkter (Consumer Product Safety Commission, 1994).

3 Utvärdering av förstudie

Det kan konstateras att den statistik som i dagsläget finns tillgänglig över fyrverkerirelaterade olyckor i Sverige är alltför knapphändig för att kunna ge en bra bild av skademönster och skadepotential hos de pyrotekniska artiklar som finns att tillgå på marknaden. För att ge en mer detaljerad bild av detta krävs att utländsk statistik beaktas, något som inte är helt oproblematiskt eftersom det förekommer skillnader i hur och när fyrverkerier används.

Vad som däremot är tydligt, oavsett vilken olycksstatistik som studeras, är att olyckor sker, med mer eller mindre allvarliga skador eller dödsfall som följd. Andel skador som orsakas av fyrverkeritårtor är av statistiken att döma förhållandevis liten, men det är emellertid viktigt att ha i åtanke att en fyrverkeritårtas skadepotential är stor eftersom de normalt innehåller många skott och dessutom inte går att stoppa när de väl antänts. Många olycksrapporter vittnar om att allvarliga olyckor inträffat i samband med att fyrverkeritårtor välts, och det ligger därför nära till hands att dra slutsatsen att det kan gå mycket illa när olyckan väl är framme. Detta bekräftas även av amerikansk statistik där bland annat fyrverkeritårtor visat sig vara överrepresenterade vad gäller åsamkande av allvarligare skador, se avsnitt 2.1.6.

Det är dock inte bara direkta personsador som är av intresse för denna studie.

Brandriskproblematiken är även en viktig faktor som måste beaktas, då statistiken visar att många bränder uppstår med fyrverkerier som huvudsaklig brandorsak. När skotten från en fyrverkeripjäs exploderar sker kemiska reaktioner vid temperaturer som kan uppnå flera tusen grader, vilket enkelt kan ge upphov till brännskador och antända fibrösa material. Statistiken visar dessutom att en stor del av de bränder som orsakas av fyrverkerier är utomhusbränder, av vilka en stor del startar i containrar, sopkärl och dylikt.

Det är uppenbart att fabrikationsfel på enstaka exemplar av en viss artikel kan orsaka att olyckor inträffar. Dock är det inget som anses kunna påverkas av denna studie då det förutsätts att samtliga parter jobbar för att minimera fabrikationsfel. Olycksstatistiken i kombination med de rapporter som finns kring fyrverkerirelaterade olyckor pekar dock på att det framförallt är handhavandefel som är huvudorsaken till de flesta av olyckorna. Då denna studie inte inriktar sig på hur man kan begränsa dessa handhavandefel läggs fokus istället på att identifiera vilka faktorer det är som faktiskt orsakar vältning i de fall då rekommendationerna för handhavande följs.

En stor del av problematiken med vältande fyrverkeritårtor har med underlaget att göra, det vill säga att de, när de placeras på instabilt underlag, inte uppfyller de krav på fysisk stabilitet som ställs vid prövning. Det bör även poängteras att vissa underlag som kan framstå som säkra inte alltid är det. Ett exempel kan vara ett brunnslock på en gräsmatta som faktiskt är plant och hårt, men kanske inte tillräckligt stort. Detta skulle kunna leda till att en fyrverkeritårta som är större än brunnslocket välter då ett skott avfyras utanför stödytan. Vältningsbenägenhet är i dagsläget inget som bedöms avskilt i dessa funktionalitetstester, men statistik och olycksrapporter pekar på att detta är något som måste börja tas i beaktning vid godkännande av fyrverkeritårtor. Behovet av en ny testmetod för denna typ av bedömning är därför stort.

Framtagande av metod för testning av vältningsbenägenhet

Den övergripande idén för fortsatt studie av vältningsbenägenheten hos fyrverkeritårtor är att ta fram en effektiv metod för prövning av tårtors säkerhet med avseende på vältning. Denna metod ska huvudsakligen baseras på beräkningar och enklare mätningar snarare än statistiska mängdförsök som kräver att ett stort antal produkter testas. Idén är också att på ett vetenskapligt sätt studera fyrverkeritårtors skadepotential eftersom det från tidigare olycksrapporter finns indikationer på att denna kan vara hög när olyckor väl inträffar.

4 Försök

I detta kapitel redovisas arbete med praktiska försök, från urvalsprocessen och försöksuppställning till genomförande och resultat.

4.1 Val av försöksuppställningar

Eftersom det inte finns någon tidigare framtagna testmetod vad gäller utredning av vältningsbenägenheten hos fyrverkeritårtor som enskild parameter i godkännandeprocessen, utgör denna studie ett slags pionjärbete i sammanhanget. I detta kapitel utreds vilka parametrar som är intressanta att studera med avseende på vältning och huruvida de är möjliga att studera på ett vetenskapligt sätt. Syftet med försöken är också att illustrera vilka risker en vältande fyrverkeritårta kan innebära för åskådare och omkringliggande bebyggelse. I kapitlet presenteras också de tankegångar och den process som lett fram till slutgiltigt val av försöksuppställningar.

4.1.1 Möjliga försöksuppställningar

I detta avsnitt presenteras de försöksuppställningar som är mest intressanta för denna studie, vilket syftet med respektive försök är samt vilken metod som används och vilka parametrar som undersöks. Samtliga försök filmas med så många videokameror som försöket kräver.

4.1.1.1 Försöksuppställning 1 - Rekylkraft

Syfte: Syftet med denna typ av mätning är att få en uppfattning om storleken på rekylkraften, och hur denna kraft kan påverka tårtans stabilitet och vältningsbenägenhet. Stabiliteten hos en fyrverkeritårta som placeras på ett ostadigt underlag kommer i större eller mindre utsträckning påverkas av denna rekylkraft.

Metod: Mätning av kraften från rekylen kan göras genom att placera fyrverkeritårtan på ett flertal lastceller, arrangerade på ett sådant sätt att kraften som verkar mot underlaget kan mätas. Därefter kan denna kraft användas för att beräkna vridmomentet som verkar på tårtan.

4.1.1.2 Försöksuppställning 2 - Slagkraft och rörelseenergi

Syfte: Att undersöka skottens slagkraft och rörelseenergi på olika avstånd från fyrverkeritårtan.

Metod 1: Avfyrning sker horisontellt mot en så kallad vittnesplåt, som är en tunn metallplåt som bland annat används av FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut) vid undersökning av splittr från bomber. Inbuktningen från skotten ger en uppfattning om den kraft som skotten kommer ifrån med. Fyrverkeritårtan placeras i en egenkonstruerad ställning där lutningsvinkeln mot marken kan justeras.

Metod 2: Avfyrningen filmas på nära håll varpå skottets hastighet kan beräknas genom att studera det filmade materialet. Bredvid fyrverkeritårtan placeras en lodrät regel referensmätning.

4.1.1.3 Försöksuppställning 3 - Temperatur i explosionsögonblicket

Syfte: Att mäta temperaturen i explosionsögonblicket då skottet från fyrverkeripjäsen briserar. I explosionsögonblicket brinner de kemiska föreningarna i skottet med mycket höga temperaturer vilket kommer kunna antända de flesta tyg- och plastmaterial som kläder är gjorda av.

Metod 1: Avfyrning sker mot en uppsamlingsbehållare i vilken termoelement placeras, varpå temperaturen i explosionsögonblicket kan registreras.

Metod 2: Avfyrning sker längs marken mot upphängda jackor alternativt mot docka med jacka.

Metod 3: Ett skott plockas ut från en fyrverkeritårta och antänds i laboratorium där temperaturen mäts.

4.1.1.4 Försöksuppställning 4 - Värmeuppbyggnad

Syfte: Att undersöka om det sker någon markant värmeuppbyggnad och temperaturökning vid fyrverkeritårtans kontaktyta mot underlaget. Detta skulle kunna utgöra en vältningsrisk om

fyrverkeritårtan placeras i exempelvis en snödriva.

Metod: Termoelement placeras på ett flertal ställen i direktkontakt mot fyrverkeritårtans undersida.

4.1.1.5 Försöksuppställning 5 – Skjutlängd i sidled

Syfte: Att undersöka om de säkerhetsavstånd som finns tryckta på fyrverkeripjäserna verkligen är representativa för verkligheten, det vill säga om en åskådare kan utsättas för fara trots att säkerhetsavståndet är uppnått. Säkerhetsavståndet baseras på när en fyrverkeripjäs fungerar felfritt på plant underlag³, men det är högst troligt att säkerhetsavståndet hade varit större om hänsyn tagits till vältning.

Metod: Fyrverkeritårtan placeras i en egenkonstruerad ställning där lutningsvinkeln mot marken kan justeras. Lutningsvinkeln beräknas för att ge optimal skottlängd och så lång teoretisk kastlängd som möjligt. Koner placeras på marken med 10 meters mellanrum, och försöket filmas för att i efterhand kunna bedöma kastlängden på skotten.

4.1.1.6 Försöksuppställning 6 - Omkullvält fyrverkeritårta

Syfte: Att undersöka vad som händer när en fyrverkeritårta fyras av liggandes fritt på sidan. Det bedöms troligt att rekylen från skotten kan få tårtan att röra sig på ett oberäkneligt sätt vilket innebär fara för åskådare. Observationer görs av huruvida den omkullvälta tårtan är benägen att välta tillbaka till stående läge när skott avfyras och om detta i så fall är beroende av om det avfyrade skottet är placerat nära eller längre bort från marken. Försöket är av mindre vetenskaplig karaktär och utförs i syfte att påvisa det problem som MSB påpekat och som ligger till grund för denna studie, samt för att visualisera vad som kan hända när en fyrverkeripjäs handhas på ett felaktigt sätt.

Metod: Fyrverkeritårtan avfyras liggandes på sidan på plant underlag utan fasthållande konstruktion eller mätutrustning.

4.1.1.7 Försöksuppställning 7 - Nedåtriktad fyrverkeritårta

Syfte: Att undersöka vad som händer när en fyrverkeritårta av misstag placeras med bombrörens mynningar riktade ner mot underlaget. Detta anses vara ett troligt scenario i de fall användaren är alkoholpåverkad, som i hög grad kan få förödande konsekvenser för åskådare och omkringliggande bebyggelse. Försöket är av mindre vetenskaplig karaktär, och utförs i syfte att påvisa det problem som MSB påpekat och som ligger till grund för denna studie, och för att visualisera vad som kan hända när en fyrverkeripjäs används på ett felaktigt sätt.

Metod: Tårtan avfyras uppochnar på plant underlag utan fasthållande konstruktion eller mätutrustning.

4.1.2 Urvalsprocess

I detta avsnitt presenteras den urvalsprocess som låg till grund för valet av försöksuppställningar inför de slutgiltiga försöken. Avgörande för dessa val var i huvudsak:

- Huruvida testet kunde genomföras på ett vetenskapligt sätt
- Hur troligt det bedömdes att försöket kunde genomföras med lyckat resultat
- Vilka tekniska möjligheter det fanns att genomföra försöket med lyckat resultat
- Vilka resurser som fanns tillgängliga för att genomföra det specifika försöket
- Hur tidskrävande försöket skulle vara i förhållande till det erhållna resultatets relevans.

³ Telefonsamtal med Shulin Nie, MSB. 2012-10-12.

4.1.3 Valda försöksuppställningar

De försöksuppställningar som valdes att utredas vidare är:

- Försöksuppställning 1 – Rekylkraft
- Försöksuppställning 2 – Slagkraft och rörelseenergi (metod 2)
- Försöksuppställning 5 – Skjutlängd i sidled.

Gemensamt för dessa försöksuppställningar var att det bedömdes att det, på ett rimligt sätt, skulle kunna gå att genomföra mätningar av ingående parametrar, samt att det dessutom fanns mycket goda förutsättningar för lyckade resultat. Respektive försöksuppställning och försök beskrivs i detalj i avsnitt 4.2.

Vid studerande av skottens slagkraft och rörelseenergi valdes metod 1 bort på grund av att den inte ger ett värde på anslagskraftens storlek, utan endast ger en visuell bild av vad kraften kan åstadkomma på en viss plåt. Det var även oklart hur tjocka plåtar som skulle behöva användas vid försöken, vilket skulle kunna innebära att tjockleken på vittnesplåten först skulle behöva testas. Dessa faktorer gjorde att metoden inte ansågs vara tillräcklig i förhållande till de erhållna resultatens relevans.

Mätningar av temperaturen i explosionsögonblicket för ett skott från en fyrverkeripjäskulle med tillgänglig utrustning, det vill säga termoelement, vara mycket svåra att genomföra, på grund av den snabba temperaturförändringen som uppstår. Mycket känsliga termoelement skulle därför ha behövts, vilket innebär att de sannolikt hade förstörts i explosionsögonblicket och att det därmed skulle vara mycket svårt att erhålla något exakt värde på temperaturen. Idén att detonera ett skott från en fyrverkeritårta inomhus ansågs vara förenad med stora risker och förkastades därför. Metoden att avfyra skott mot klädesplagg valdes bort eftersom det bedömdes som relativt osannolikt att försöket skulle leda till något konkret resultat.

Temperaturuppbyggnaden i kontaktytan mellan fyrverkeritårten och underlaget anses vara så pass liten att den inte kommer ge upphov till någon nämnvärd påverkan på underlaget, eftersom det i botten på bombrören sitter isolerande lerpluggar med flera centimeters tjocklek. Risker finns också att dessa lerpluggar går sönder vid avfyrning, med risk för skador på de intilliggande termoelementen som följd. Därför väljs denna försöksuppställning bort.

Vidare genomförs också försök enligt försöksuppställning 6 och 7 trots att dessa egentligen inte faller inom ramen av vad som kan anses vara vetenskapliga försök. Anledningen till att dessa ändå genomförs är att det finns ett behov av att illustrera de risker en vältande eller felplacerad fyrverkeritårta kan innebära för åskådare och omkringliggande bebyggelse.

4.2 Praktiska försök

I detta avsnitt beskrivs förberedelser, tillvägagångssätt och sammanfattning av resultat från de två försöksomgångar som genomförts. Slutsatser från första försöksomgången samt revidering av försöksuppställningen inför försöksomgång två presenteras också i detta avsnitt. Fullständiga resultat redovisas i bilaga C.

4.2.1 Försöksomgång 1

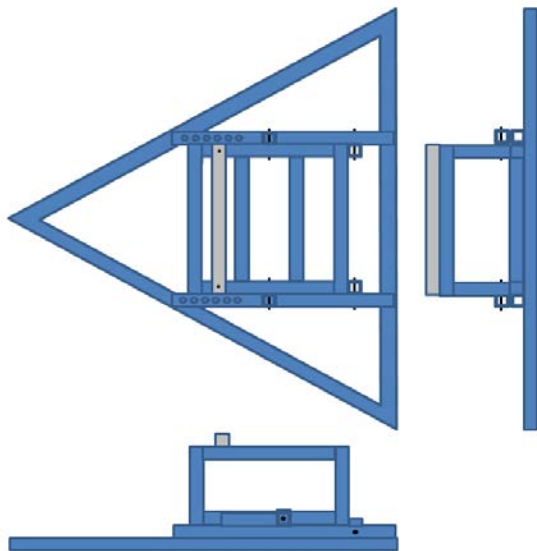
I detta avsnitt beskrivs arbetet med att utföra de försök som utvaldes i avsnitt 4.1.3.

4.2.1.1 Förberedelser

För att kunna avfira tårtorna på ett stabilt och säkert sätt bedömdes att en ställning behövde konstrueras. Ställningen ansågs behöva ha följande egenskaper:

- Stabil, stum konstruktion
- Ställbar lutning
- Tre mätpunkter för ändring av last
- Möjlighet till anpassning för olika stora tårtor

Utifrån dessa punkter togs en ritning fram enligt figur 11.



Figur 11 – Ritning över ställningen.



Figur 11 – Den färdigbyggda ställningen.

Ställningen tillverkades i 25 millimeters fyrkantstålrör som svetsades samman, gängstavar användes som gångjärn. Resultatet visas i figur 12.

4.2.1.2 Försöksuppställning

Vid försöken användes tre lastceller med tillhörande kopplingsdosa, drivna av ett spänningsaggregat inställt på 12 V. Vidare kopplades dessa till en datalogger med en maximal samplingsfrekvens på 25 Hz, inställd på kontinuerlig sampling. Ställningen, som beskrevs i föregående stycke, placerades på lastcellerna med en lastcell i vart hörn av triangeln, se figur 13. Bredvid ställningen placerades en trästolpe med höjdmärkingar för uträkning av projektilens utgångshastighet med hjälp av kameror som filmade med 30 bilder per sekund. För skjutning i längdriktningen placerades koner ut med 10 meters mellanrum för att möjliggöra uppskattning okulärt och med kameror. Kamerorna flyttades sedan för att filma förloppet vid fritt skjutande tårter liggandes på sidan respektive ståendes nedåtvänd.



Figur 13 – Ställningen uppställd på lastceller bredvid trästolpe som höjdsreferens.

4.2.1.3 Genomförande

Vid första försökstillfället gjordes åtta försök enligt tabell 2 nedan.

Tabell 2 - Genomförda försök, försökstillfälle 1

Försök	Uppställning	Mätning
1	Tårta 1 avfyrad rakt uppåt	Rekylkraft + projektilhastighet
2	Tårta 2 avfyrad rakt uppåt	Rekylkraft + projektilhastighet
3	Tårta 1 avfyrad rakt uppåt	Rekylkraft + projektilhastighet
4	Tårta 2 avfyrad rakt uppåt	Rekylkraft + projektilhastighet
5	Tårta 1 avfyrad med 30° vinkel	Längdmätning, visuell
6	Tårta 2 avfyrad med 30° vinkel	Längdmätning, visuell
7	Tårta 1 avfyrad fritt lagd på sidan	Visuell observation
8	Tårta 1 avfyrad fritt nedåtvänd	Visuell observation

Vid försök 1 – 4 registrerades kraftmätningarna via dataloggern i en dator. Under försök 2 gled ställningen av två lastceller vilket ledde till dåliga mätvärden. Detta åtgärdades med betongplattor som stöttade upp konstruktionen. Kamerorna filmade händelseförloppet. Vid försök 5 – 6 användes en avfyrningsvinkel på 30° mot marken, se figur 14, och en kamera filmade från sidan för uppskattning av längd med hjälp av konerna. Även en person placerades ut för att okulärt uppskatta skjutlängden.



Figur 14 – Försök 6.

Vid försök 7 avfyra en tårta liggandes fritt på sidan för att studera händelseförloppet. Försöket filmades från avstånd. Försök 8 utfördes på liknande sätt, men placerad med botten uppåt och skjutriktning nedåt.

4.2.1.4 Resultat

Utifrån de diagram som skapades av mätresultaten från försök 1 – 4 drogs slutsatsen att dataloggern inte tagit in informationen tillräckligt snabbt. Därmed erhöles missvisande resultat med oregelbundna och negativa värden, som bedömdes ej återspegla verkligheten. Projektilhastigheten kunde inte avläsas i de filmklipp som togs. Efter studerande av filmerna konstaterades att bildhastigheten 30 bilder per sekund var för låg för att kunna spåra projektilen och uppskatta dess hastighet. Det var även svårigheter att se projektilen precis ovanför tårtan då det ofta uppstod en hög eldkvast från mynningen som försvårade avläsning, se figur 15.



Figur 15 – Skärmdump från video av försök 4.

Försök 5 – 6 resulterade endast i en okulär uppskattning av skjutlängden, då effekterna inte syntes mot den ljusa himlen eller var utanför bild. Resultaten av skjutlängdsförsöken visas i tabell 3.

Tabell 3 - Skjutlängd vid 30° vinkel.

Tårta 1	80 meter
Tårta 2	110 meter

Vid försök 7 avgick endast ett skott horisontellt, då kraften från skottet fick tårtan att välta rätt, det vill säga tillbaka till stående position. Se figur 16. Detta skedde troligen på grund av att tårtan var placerad så att första skottet kom från den högst placerade raden och därmed skapade största möjliga vridmoment, vilket fick tårtan att tippa över.



Figur 16 – Försök 7.

Vid försök 8 avfyra första skottet nedåt vilket briserade vid anslaget mot marken. Detta fick tårtan att välta på sidan likt försök 7 och nästa skott kom även nu i översta raden, vilket således medförde att tårtan restes till upprätt position efter andra skottet, se ovanstående resonemang.

4.2.1.5 Utvärdering av resultat samt analys av felkällor

Som nämnts ovan visade det sig att dataloggern hade för låg samplingsfrekvens för att kunna ge en detaljerad bild av de lastförändringar som åstadkoms i det ögonblick projektilen skjuts iväg från bombröret. Därför bedöms mätvärdena från försök 1 – 4 vara otillräckliga för att ge tillförlitliga värden. Efter närmare diskussion med sakkunniga på bland annat FOI och institutionen för Teknisk Akustik kunde det konstateras att en samplingsfrekvens på 25 Hz är långt ifrån tillräcklig för att kunna

återge dessa snabba lastförändringar, samt att det krävs frekvenser på kilohertznivå för att erhålla användbara mätvärden^{4,5}.

Eftersom filmerna som skulle användas till beräkning av projektilhastighet filmades med otillräcklig bildhastighet, samt att projektilen många gånger inte kunde urskiljas i den skymmande eldkvasten som uppstod vid mynningen, kunde inte beräkningen genomföras och således uteblev resultat.

Försök 5 – 6 resulterade i okulärt uppskattade mätvärden som bedömdes vara tillräckligt tillförlitliga och noggranna i förhållande till försökets natur.

Eftersom försök 7 visuellt skulle påvisa faran med en vält fyrverkeritårta bedömdes försöket som misslyckat. Det konstaterades att tårtan troligen alltid kommer att välta rätt då de första skotten avfyras från översta raden och att tårtan borde vändas vid framtida försök så att de första skotten ligger under tårtans tyngdpunkt. Resonemanget förutsätter att tårtan placeras på ett hårt och plant underlag.

Försök 8 bedöms som en lyckad observation, då händelseförloppet ansågs förefalla logiskt. Efter första skottet välte tårtan på sidan med första skottraden överst, vilket gav upphov till samma förutsättningar som i försök 7, se figur 17. Så länge underlaget är hårt och plant anses detta förlopp kunna förväntas inträffa vid liknande försök.



Figur 17 – Händelseförloppet vid försök 8.

4.2.2 Försöksomgång 2

I detta avsnitt presenteras arbetet med att förbättra förutsättningarna för de försök som bedömdes otillräckliga efter försöksomgång 1 samt utförandet av nya försök.

4.2.2.1 Reviderad försöksuppställning

Eftersom flera resultat från försöksomgång 1 bedömdes vara otillräckliga för att kunna dra några slutsatser angående försöksmetoden krävdes nya försök med en reviderad försöksuppställning. Efter analys av felkällor och diverse konsultation med sakkunniga gjordes bedömningen att nya försök skulle kräva följande:

- Mätutrustning med högre samplingsfrekvens – i storleksordningen kilohertz
- Kamera med högre bildhastighet – tillräcklig för att kunna urskilja den sträcka ett skott förflyttas för varje tidssteg. Detta för att möjliggöra beräkning av skottets utgångshastighet
- Inställning på kameran som kunde göra det möjligt att tydligare urskilja skottet trots det starka ljuset från eldkvasten som uppstår vid mynningen i avfyrningsögonblicket
- Möjlighet att frilägga bombrör för avfyrning av ett skott i taget med så lite störningar som möjligt. Detta då den stora ställningen, som användes i försöksomgång 1, tillsammans med massan från resterande skott i tårtan kan bidra till störningar i form av ett trögare system⁶.

⁴ Telefonsamtal med Roger Berglund, FOI. 2012-10-30

⁵ Möte med Anders Sjöström, Avdelningen för Teknisk Akustik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-11-05.

⁶ Möte med Per Johan Gustafsson, Avdelningen för Byggnadsmekanik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-10-29.

Avfyrning av enkelskott skulle sannolikt också resultera i tydligare, mer lätthanterliga och framförallt rättvisare mätvärden eftersom all last koncentreras till endast en mätpunkt. Detta för att lastcellernas känslighetsområde var 0 – 250 kg och rekylkraftens storleksordning befann sig lågt inom detta område. Att kraften delats upp på tre mätpunkter lär ha bidragit till att denna varit svår att utläsa i förhållande till de störningar som varje lastcell gav upphov till⁷.

- Bättre möjlighet att demonstrera faran vid avfyrning i sidled, det vill säga simulering av avfyrning under mindre gynnsamma förhållanden.

4.2.2.2 Förberedelser

Utifrån ovanstående punkter inleddes ett arbete med att införskaffa utrustning, något som inte var helt oproblematiskt då det handlade om relativt avancerad teknisk utrustning. Efter samtal med ett flertal avdelningar inom Lunds Tekniska Högskola och Lunds Universitet erhöles slutligen lämplig utrustning. Arbetet fortgick sedan med inläring, injustering och testning av utrustningens tillräcklighet. Detta gjordes bland annat genom att utföra kraftmätningstester vid hammarslag, för att simulera en mycket kortvarig lastförändring, samt genom att filma en mindre dammexplosion för att simulera en snabb ljusökning och för att fånga ett mycket kort händelseförlopp med hög bildhastighet och detaljrikedom.

En enkel ställning tillverkades för att möjliggöra avfyrning av enskilda bombrör som separerats från en tårta. En principskiss över ställningen visas i figur 18. En aluminiumplatta anpassades till ställningens innermått för att förbättra bombrörets stabilitet och kontakt med lastcellen.



Figur 18 – Ställning för enskilda bombrör samt aluminiumplatta.

4.2.2.3 Försökuppställning

Den tekniska utrustning som användes vid andra försökstillfället var:

- En lastcell med tillhörande kopplingsdosa och spänningsaggregat
- Stationär dator med integrerat datasamlingskort med maximalt 100 kHz samplingsfrekvens, inställd på 10 kHz vid försöken
- Höghastighetskamera inställd på 500 – 4000 bilder per sekund.

19 bombrör separerades från en fyrverkeritårta av typ 1. Ställningen placerades runt en lastcell på vilken aluminiumplattan lades. En trästolpe med en höjdmärkning var tionde centimeter placerades bredvid ställningen. Uppställningen visas i figur 19, där även ett bombrör är placerat i ställningen. Höghastighetskameran riggades upp och ställdes in för att tåla starkt ljus.



Figur 19 – Försök med enskilda bombrör.

⁷ Möte med Anders Sjöström, Avdelningen för Teknisk Akustik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-11-05.

4.2.2.4 Genomförande

Totalt 17 tester utfördes, varav 13 med skjutriktningen uppåt och fyra med nedåtriktad mynning, se figur 20. För varje test gjordes kraftmätning och höghastighetsinspelning. Av de två återstående bombrören var det ett som ej avfyrades, troligen på grund av att stubinen skadats vid separationen från tårtan. Det andra röret öppnades för att plocka ut effektladdningen för vägning.



Figur 20 – Enkelrör avfyrate uppåt- respektive nedåtvänt.

Slutligen upprepades försöket att avfyra en tårta på sidan, denna gång med de första skotten närmast marken för att undvika att tårtan restes efter första skottet. Försöket filmades med höghastighetskamera.

Efter försöken studerades videoklippen och en projektilhastighet kunde räknas ut genom att studera förflyttning och förfluten tid.

4.2.2.5 Resultat

Efter försöksomgång 2 kunde konstateras att mätutrustningen som använts skapat tillräckligt väl detaljerade mätvärden för att dessa skulle kunna användas vidare. Det visade sig också att höghastighetskameran möjliggjort beräkningar av projektilhastigheten ovanför mynningen på bombrören. I tabell 4 redovisas erhållna värden för kraft och projektilhastighet samt medelvärden för dessa. Diagram från samtliga kraftmätningar redovisas i bilaga C.

Tabell 4 - Resultat från enkelrörsförsök

Upprätt försök	Maximal rekylkraft [N]	Projektilhastighet [m/s]
1	300	<i>Ej inspelad video</i>
2	200	50
3	200	40
4	250	<i>Projektil kunde ej urskiljas, stor mängd effekter</i>
5	350	60
6	200	50
7	300	60
8	250	<i>Projektil kunde ej urskiljas, stor mängd effekter</i>
9	250	<i>Kamera felriktad</i>
10	300	50
11	150	40
12	200	<i>Projektil kunde ej urskiljas, stor mängd effekter</i>
13	200	50
Medelvärde	250	50
Nedåtriktat försök		
1	1400	-
2	1700	-
3	1300	-
4	1600	-
Medelvärde	1500	-

Försöket med tårtan som avfyrades på sidan åskådliggjorde ett oberäkneligt beteende, där flera skott fyrades av horisontellt i olika riktningar längs marken innan den vältes upp av ett skott avfyrat högt på

tårtan, se figur 21. Denna observation påvisar faran som kan uppstå när en fyrverkeritårta välter och kan därmed anses vara ett lyckat visuellt försök.



Figur 21 – Tårta avfyrad på sidan

4.2.2.6 Utvärdering av resultat

Försöksomgång 2 bedömdes sammanfattningsvis som lyckad eftersom den resulterade i mätvärden som ansågs godtagbara. I försök 1 – 13 hamnade den uppmätta rekylkraften på mellan 150 – 300 N, vilket var av den storleksordning som ansågs väntad. I de nedåtriktade försöken uppmättes betydligt större rekylkrafter. Detta beror troligen på att den uppmätta kraften är summan av anslagskraften när kulan slår i lastcellen och den kraft som följer av den tryckuppbyggnad som bildas inuti röret i detta ögonblick. Denna tryckuppbyggnad bidrar därmed till rörets acceleration uppåt, vilket också orsakar ökat utslag från lastcellen.

Medelvärdet av projektilhastigheten beräknades till 50 m/s, dock kunde ingen märkbar inbromsning konstateras under de första två metrarna ovanför fyrverkeritårtan. Hastigheten på projektilen kan jämföras med en tennisserve, vilken har potential att orsaka personsador. Ett skott från en fyrverkeritårta är emellertid hårdare och mindre elastisk än en tennisboll. Dock är det inte bara anslaget från projektilen som utgör fara, utan till stor del också sprängkraften som uppstår om skottet briserar vid anslaget. Denna sprängkraft kan orsaka allvarliga skador samtidigt som de brinnande kemikalierna kan bidra till brännskador.

5 Beräkningsmodell

I detta avsnitt behandlas själva mekaniken bakom fenomenet vältning, vilka ingående parametrar som är av betydelse samt de tankegångar och den process som lett fram till den beräkningsmodell som föreslås i denna rapport. Slutligen presenteras själva beräkningsmodellen samt validering av denna modell. Resonemangen som redovisas i kapitlet baseras på rådande mekaniklagar samt beräkningar i bilaga D.

5.1 Ingående parametrar

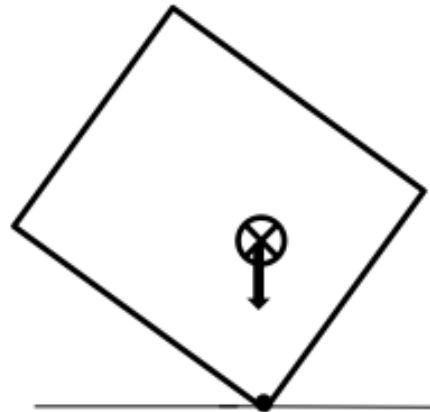
Precis som antytts i avsnitt 2.3 har tyngdpunktens läge stor betydelse för hur benägen en fyrverkeritårta är att välta. Låg tyngdpunkt och stor massa gör tårtan stabil, medan motsatsen gör den mer benägen att välta. För att tårtan ska välta krävs att dess tyngdpunkt passerar normalen till momentpunkten kring vilken tårtan roterar. I detta fall innebär detta att tyngdpunkten, som markerats med ett kryss i figur 22, måste passera längre åt vänster än momentpunktens läge, det vill säga tårtans hörn. Är vinkelhastigheten inte tillräckligt stor sker ej detta och tårtan vänder och välter tillbaka till ursprungsläget.

Vidare kommer en tårta med stor bottenarea vara mer stabil än om bottenarean är liten, varför detta också är en viktig parameter som måste tas i beaktning när en fyrverkeritårta konstrueras.

En parameter som ytterligare har betydelse för en fyrverkeritårtas vältningsbenägenhet är den rekylkraft som uppkommer i det ögonblick då skottet skjuts iväg från bombröret. Mängden svartkrut påverkar i allra högsta grad detta, men även faktorer så som packningsgrad och sammansättning av svartkrutet har betydelse⁸, något som dock bedöms ligga utanför detta arbetes ramar att utreda. Istället konstaterades att resultatet av dessa parametrar, det vill säga själva rekylkraften, skulle utredas.

En absolut felfri fyrverkeritårta som placeras på ett perfekt plant underlag kommer i teorin inte att kunna välta så länge dess bombrör är vinkelräta mot underlaget⁹. Detta eftersom rekylkraften som påverkar fyrverkeritårtan således också är vinkelrät mot underlaget. Som nämndes i kapitel 3 utgör dock underlaget en stor del av problematiken kring vältande fyrverkeritårtor.

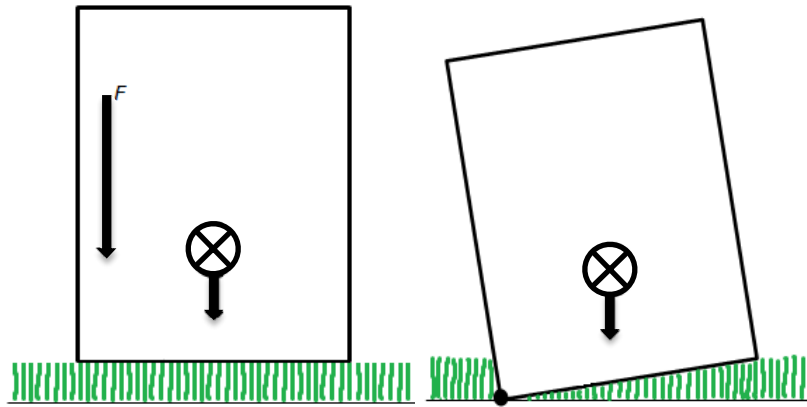
Sviktande underlag såsom tätt gräs, en löst packad jordhög eller en mjuk snödriva kan utgöra en risk när en instabil fyrverkeritårta placeras på sådant underlag. Figur 23 visar principen för vältning av en fyrverkeritårta som placerats i tätt gräs. Rekylkraften från skottet kan påverka tårtan så att gräset packas ihop under denna. Om rekylkraften är kraftig och tårtan har en ofördelaktig geometri kan detta leda till vältning.



Figur 22 – Vältande tårta åt vänster. För vältning krävs att tyngdpunkten passerar normalen till momentpunkten.

⁸ Telefonsamtal med Shulin Nie, MSB. 2012-10-13

⁹ Möte med Kristian Stålne, Avdelningen för Byggnadsmekanik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-11-15



Figur 23 – Principskiss över vältningsförlopp på sviktande underlag.

Emellertid bedöms vältning på sviktande underlag vara alltför komplext för att kunna modelleras analytiskt. Istället skulle numeriska metoder krävas¹⁰, vilket ligger på en nivå utanför detta arbete.

En annan möjlig och högst trolig vältningsrisk med avseende på underlaget är då en fyrverkeritårta placeras på ett hårt underlag med ojämnheter. Detta problem går att modellera analytiskt, och är också det typfall som ligger till grund för den beräkningsmodell för kontroll av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet som presenteras i denna studie, se bilaga D.

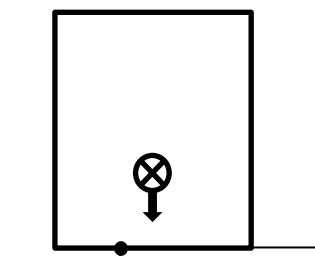
Sammanfattningsvis kan konstateras att de huvudsakliga faktorerna hos en fyrverkeritårta som påverkar dess stabilitet och benägenhet att välta är:

- Placeringen av tårtans tyngdpunkt
- Storleken på tårtans bottenarea
- Tårtans massa
- Rekylkraften från tårtans skott.

5.2 Beräkningsmodell för vältningsbenägenhet

I detta avsnitt presenteras den beräkningsmodell för fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet som tagits fram. Syftet med modellen är, som tidigare nämnts, att den ska kunna användas som verktyg för att avgöra en fyrverkeritårtas säkerhet med avseende på vältning, utan att mängdförsök skall vara nödvändiga. Utifrån en känd rekylkraft, som kan mätas enligt metoden i avsnitt 4.2 kan parametrarna som påverkar vältningsbenägenheten justeras så att fyrverkeritårtan klarar av att stå upprätt vid avfyrning över ojämnheter. Omvänt kan den maximala tillåtna mängden svartkrut beräknas för att reglera skjutkraften hos en produkt med redan fastställd geometri. Vid användande som provningsmetod för klassificering bör standardiserade mått på ojämnheter användas.

Som beskrivits i föregående avsnitt baseras beräkningsmodellen på det typfall där en fyrverkeritårta placeras på hårt underlag i vilket det finns ojämnheter. För att efterlikna sådana ojämnheter i modellen placeras fyrverkeritårtan på en avsats som kan liknas vid en tröskel med en lämplig höjd, se figur 24. För att fyrverkeripjäsen ska bedömas som säker krävs att den klarar av att stå upprätt under avfyrning då fyrverkeritårtan sticker ut med en viss andel av sin sida eller diameter över tröskelkanten. I beräkningsmodellen beräknas det fall som skapar störst vridmoment, det vill säga för de skott som är placerade längst ut från avsatsen.



Figur 24 – Tårta placerad på avsats.

¹⁰ Möte med Kristian Stålné, Avdelningen för Byggnadsmekanik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-11-15

För beräkning av huruvida fyrverkeritårtan kommer klara att stå upprätt eller inte införs en vältningsfaktor enligt

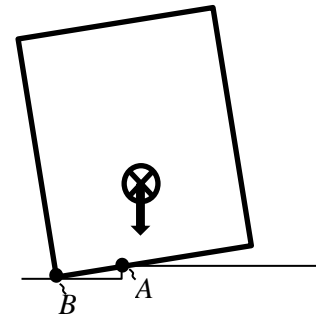
$$V_f = \frac{T}{V} \quad V_f > 1 \Rightarrow \text{Vältning}$$

där

V_f är vältningsfaktorn [-],

T är fyrverkeritårtans rotationsenergi [J],

V är förändringen av fyrverkeritårtans lägesenergi [J].



Figur 25 – Läget då övergången sker från momentpunkt A till momentpunkt B.

För att fyrverkeritårtan ska välta måste den rotationsenergi som uppkommer av skottets rekylkraft, och som får tårtan att rotera kring punkt A, se figur 25, vara större än den förändring av lägesenergi som krävs för att tårtans tyngdpunkt ska nå läget rakt ovanför punkt B då tårtan sedan roterar kring denna punkt. För fullständig redogörelse av beräkningsmodellen, se bilaga D.

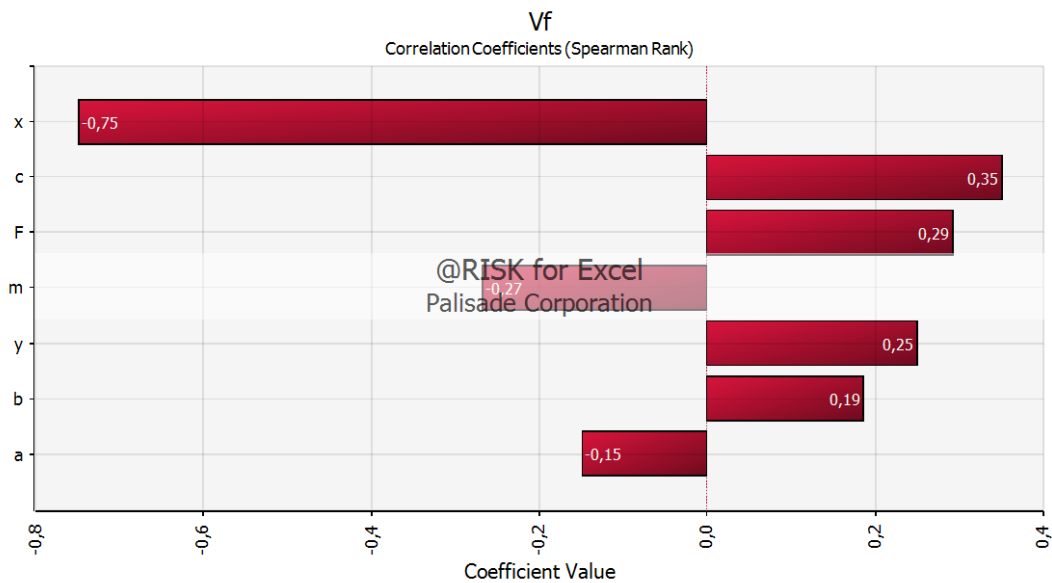
5.3 Ingående parametrars inverkan på vältningsfaktorn

I detta avsnitt presenteras resonemang kring hur beräkningsmodellens parametrar påverkar vältningsfaktorn.

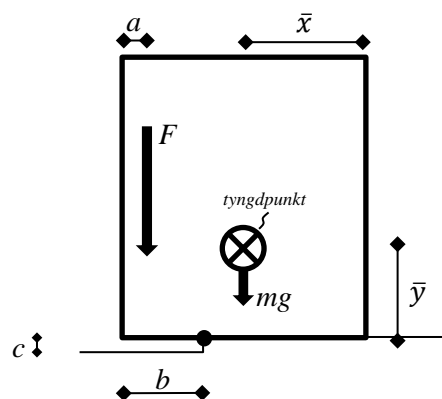
5.3.1 Känslighetsanalys

För att undersöka hur förändring av beräkningsmodellens parametrar påverkar vältningsfaktorn görs en känslighetsanalys i programmet @Risk, som är ett tillägsprogram till Microsoft Excell. Figur 26 och 27 visar rangordning av respektive parameters inverkan på vältningsfaktorn. Det kan konstateras att fyrverkeritårtans bottenarea är av stor betydelse för vältningsbenägenheten. En ökning av tårtans sida resulterar i en kraftig reducering av V_f , vilket innebär en minskning av tårtans benägenhet att välta. En ökning av tårtans massa liksom avståndet mellan kraften och tårtans sida ger också en reducering av vältningsbenägenheten, dock i mindre omfattning.

Det kan även konstateras att höjden på ojämnheten, det vill säga parameter c , är av stor betydelse för vältningsbenägenheten. En ökning av höjden på ojämnheten resulterar i en förhållandevis kraftig ökning av V_f , vilket innebär en ökning av tårtans benägenhet att välta. Samma sak gäller för den rekylkraft som verkar på tårtan. En ökning av tyngdpunktens läge i höjdlid liksom avståndet mellan kanten och tårtans sida innebär också en ökning av V_f , men i mindre omfattning.



Figur 26 – Känslighetsanalys av ingående parametrars inverkan på vältningsfaktorn.



Figur 27 – Ingående parametrar i beräkningsmodellen

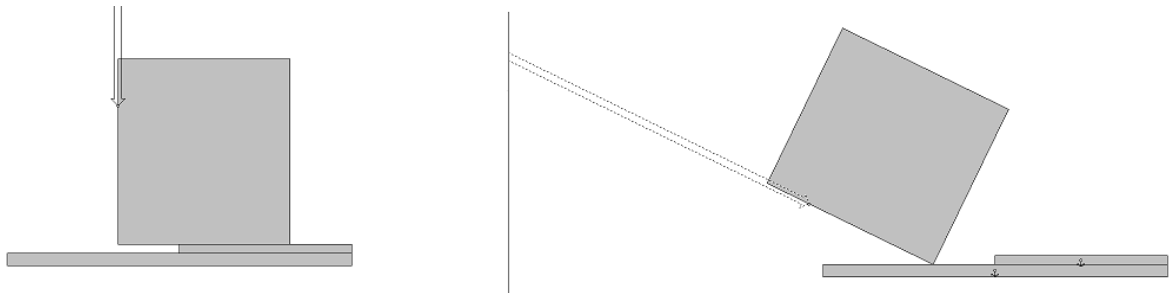
5.3.2 Förflyttning av tyngdpunkt

I bilaga D presenteras en kort beräkning som illustrerar hur tyngdpunktens läge förflyttas i sidled i takt med att skott avfyras och massa därigenom försvinner från delar av tårtan. Beräkning visar att detta fenomen har mycket liten inverkan på tyngdpunktens placering, då skillnaderna i massa efter avfyrade skott är små. Därmed kan konstateras att tyngdpunkten, tvärt emot vad som vid första anblick kan förefalla självklart, inte förflyttas i någon större utsträckning när skotten avfyras.

5.4 Validering av beräkningsmodellen

Fysiksimulatorn Interactive Physics användes för att validera beräkningsmodellen, där samtliga värden från beräkningsexemplet där vältningsfaktorn var lika med 1 användes, se bilaga D. Värden på friktions- och elasticitetskoefficient sattes som mycket höga, för att återskapa antagandena att friktion och elasticitet inte tas hänsyn till i beräkningsmodellen. I datorsimuleringen som skapades sattes rekylkraften som aktiv fram till dess att tårtans hörn nådde marken, i analogi med resonemanget att kraften då inte längre påverkar vinkelhastigheten.

I programmet bekräftades att tårtan inte välte då vältningsfaktorn var mindre än 1, men välte då vältningsfaktorn var större än eller lika med 1, för några olika värden på tröskelhöjden c . I figur 27 illustreras hur tårtan välter, då vältningsfaktorn är lika med 1. Dock visade programmet på tendenser till begränsningar i beräkningsmodellens giltighetsområde, till exempel när tröskeln var hög och sträckan b som tårtan sticker ut med över tröskeln var låg. Detta då kraften behövde ansättas som verksamt under en tid som var i en storleksordning avsevärt större än den för de uppmätta krafterna.



Figur 28 – Skärmdump från programmet Interactive Physics. Vältning då vältningsfaktorn är lika med 1.

Det kan konstateras att beräkningsmodellen stämmer bra överens med verkligheten för vissa fall, men att det även finns fall då modellen inte är tillämpbar. Därmed konstateras att modellen är i behov av vidare validering och undersökning av dess giltighetsområde.

6 Slutligt resultat

I kapitel 3 konstaterades att en metod för testning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet skulle tas fram. Den mätmetod för rekylkraften som presenteras i avsnitt 4.2.2 och den beräkningsmodell som presenteras i kapitel 5 anses tillsammans utgöra en grund för en sådan metod. Med denna metod kan en godtycklig tårta utsättas för mätning av rekylkraften. Värdet på denna kraft förs sedan in i beräkningsmodellen, där variablerna anpassats för den aktuella tårtans fysiska egenskaper såsom geometri, massa och tyngdpunktens placering. De parametrar som inte berör tårtans egenskaper bör dock fastställas och få verklighetstroga värden.

På längre sikt kan dessa värden standardiseras och, tillsammans med standardisering av övriga detaljer i metoden, leda till att hela metoden för testning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet kan användas vid exempelvis godkännande och klassificering av nya produkter.

Metoden i dess nuvarande form ska ses som grundstommen i en utvecklings- och valideringsprocess som kan leda fram till en standardiserad testmetod för fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet, med tillhörande gränsvärden för godkännande och klassificering. Metoden anses ha god potential att på ett effektivt sätt kunna testa vältningsbenägenheten hos nya produkter som ska godkännas för en försäljningsmarknad, utan att behöva utföra statistiska mängdtester som inte är vetenskapligt grundade. Vidare kan metoden användas av tillverkare för att kontrollera en ny produkt och jobba proaktivt för att produkten ska klara ett visst standardiserat test. Dock anses vidareutveckling och validering av metoden vara nödvändig innan standardisering är möjlig.

7 Diskussion

I detta kapitel diskuteras den presenterade försöksmetoden och den litteraturstudie som genomförts. Diskussionen förs med avsikt att identifiera eventuella svagheter och brister i det material som presenterats, samt med avsikt att föreslå hur dessa svagheter kan beaktas i den fortsatta utvecklings- och valideringsprocessen.

7.1 Olycksstatistik

Arbetet med att eftersöka statistik som visar på skademönster kopplat till fyrverkeritårtors vältning har inte varit helt oproblematiskt. Svensk olycksstatistik finns att tillgå generellt för fyrverkerier, men när det gäller mer detaljerad information såsom skademönster beroende på typ av fyrverkeripjäs har litteraturstudien tvingats se till internationell statistik.

Förhållandena för användning skiljer sig åt mellan olika länder, mycket på grund av skillnader vad gäller under vilken säsong fyrverkerier används. Detta gör att det kan bli problematiskt att jämföra exempelvis fyrverkerirelaterad brandriskstatistik mellan dessa länder. När man jämför olycksstatistik ska man också vara medveten om att lagar och regler skiljer sig åt beroende på vilket land som studeras. Exempelvis är så kallade smällare förbjudna i Sverige, varför statistiken vad gäller olyckor fördelat på typ av fyrverkeripjäs troligtvis skulle se annorlunda ut jämfört med det diagram som presenteras i avsnitt 2.1.6.

I denna rapport studeras skadestatistik från i huvudsak USA och Storbritannien. Trots de ovan nämnda felfaktorerna gjordes ändå antagandet att handhavandemönstret ser likadant ut oavsett vilken tidpunkt på året och under vilken högtid fyrverkerierna används. Detta för att möjliggöra jämförelse av olycksstatistik från olika länder, samt för att kunna dra slutsatser ifrån denna statistik i rapporten.

Ett gediget statistiskt underlag kan utgöra en viktig grund för det fortsatta arbetet med säkerhet kring fyrverkerier. Härigenom kan skademönster för såväl fyrverkeritårtor som andra typer av fyrverkerier kartläggas och visualiseras, vilket också gör det lättare att rikta fokus mot de säkerhetsaspekter som kräver högst prioritet vid fortsatt arbete. Ett mer detaljerat statistiskt underlag kan också vara värdefullt när säkerheten för enskilda typer av fyrverkeripjäser betraktas, eftersom det kan bidra till ökad förståelse för vad som orsakar olyckor för just den typen av fyrverkeripjäser.

I enlighet med ovanstående resonemang föreslås att statistik av motsvarande karaktär som den som presenteras i rapporten förs för de förhållanden som råder i Sverige, alternativt att en officiell bedömning görs över vilken utländsk statistik som kan nyttjas i Sverige trots nationella skillnader.

7.2 Bortvalda försöksuppställningar

Utav de möjliga försöksuppställningar som listades i avsnitt 4.1.1 valdes vissa bort, exempelvis på grund av bristande tekniska möjligheter eller för att försöken ansågs vara förknippade med för höga risker. Därmed inte sagt att de bortvalda försöken inte bör genomföras av någon som faktiskt har möjlighet att utföra dem under säkra former, med tillräcklig utrustning eller med reviderade försöksuppställningar. Därför föreslås att en utredning görs huruvida studerande av de parametrar som ingår i bortvalda försök kan genomföras, antingen med beskriven försöksuppställning eller med reviderad sådan.

7.3 Praktiska försök

Det kan konstateras att den stora och kraftiga ställning som byggdes inför försöksomgång 1 inte var optimal eftersom den, tillsammans med tårtans massa, förmodligen bidrog till en tröghet i systemet. Ställningen visade sig dock vara ändamålsenlig för längdskjutningarna. När det gällde mätningar av rekylkraften visade det sig vara effektivast att mäta denna för ett skott i taget. Att beräkna kraften som

en summa av tre mätpunkter insågs vara förknippat med osäkerheter och störningar, eftersom den totala rekyllkraften i sig var relativt liten i förhållande till störningarna som lastcellerna gav upphov till. Det kan konstateras att metoden som användes under försöksomgång 2 resulterade i bra mätvärden.

Metoden som använts för uppskattning av utgångshastigheten på projektilen som skjuts iväg visade sig fungera bra, även om det är uppenbart att små mätfel kan göras eftersom det handlar om uppskattning okulärt. Dessa mätfel bedöms dock vara av mindre betydelse för resultatet. Det ska påpekas att denna studie enbart behandlat hastigheten på projektilen. I fortsatta studier finns möjlighet att titta på projektilens sprängverkan och hur denna kan påverka kroppen.

Totalt tre försök genomfördes och filmades, där tårtor placerades felvända för att undersöka och visualisera de händelseförlopp som kan fortgå när en tårta välter eller placeras på detta sätt. Det kan utifrån dessa försök konstateras att tårtans benägenhet att välta tillbaka till upprätt position beror på åt vilket håll tårtan välts. Försök 7 i försöksomgång 1 visade att en tårta som välter så att de första skotten som avlossas hamnar längst ifrån marken har en större benägenhet att välta tillbaka än om dessa skott hamnar närmast marken, som i försöksomgång 2.

Den beräkningsmodell som presenteras bygger på att tårtan välter åt det håll där ojämnheten finns, således hamnar naturligt de skott som avlossas först närmast marken när tårtan välts. Försöket i försöksomgång 2 visade att flera skott vid ett sådant händelseförlopp kunde avlossas innan fyrverkeritårtan välte tillbaka till upprätt position, varför det därmed är uppenbart att ett sådant händelseförlopp är förenat med fara för åskådare och omkringliggande bebyggelse. Det är också tydligt att kraften på tårtans skott, i kombination med tårtans geometri, är av betydelse för dess benägenhet att välta tillbaka. Försöken som diskuterats ger dock endast en fingervisning om hur det kan se ut, det vill säga för just denna tårta. I verkligheten kan helt andra förlopp utspela sig för tårtor med andra egenskaper. I försöket som genomfördes av FOI användes en mindre fyrverkeritårta med betydligt mindre kraftfulla skott. Denna fyrverkeritårta välte inte tillbaka alls under avfyrning, utan avfyrade okontrollerat samtliga skott horisontellt i olika riktningar.

De försök där maximal skjutlängd i sidled uppmättes påvisade att en välts fyrverkeritårta kan utgöra fara även utanför rekommenderade säkerhetsavstånd, då dessa är baserade på att tårtan bibehåller sin upprätta position under avfyrningen. Det anses vara värt att reflektera över huruvida rekommenderat säkerhetsavstånd ska ta hänsyn till faran vid vältning eller ej.

7.4 Beräkningsmodell

Syftet med den beräkningsmodell som presenteras i denna rapport är att den ska kunna användas som verktyg för kontrollerande myndighet i godkännandeprocessen av fyrverkeritårtor. Men tanken är också att den ska kunna användas i produktionsledet, som ett proaktivt verktyg i tillverkarnas arbete med säkerheten kring fyrverkeritårtor.

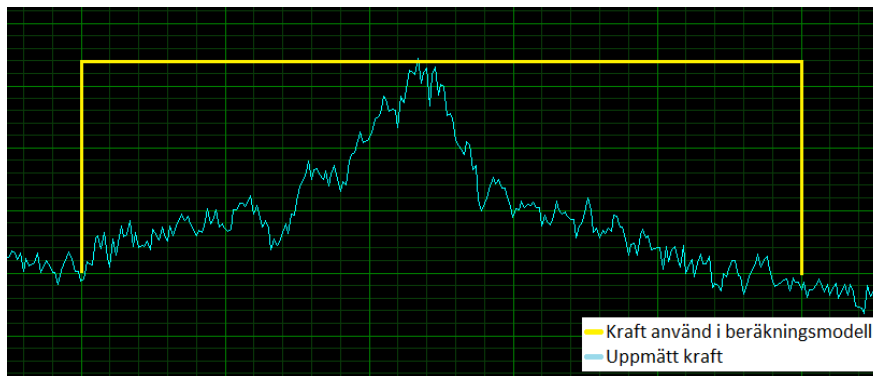
Beräkningsmodellen ska användas i syfte att undersöka om en viss produkt klarar av att stå stabilt vid avfyrning över en viss standardiserad ojämnhet. Därför krävs fortsatt arbete för att ta fram en standard för vad produkterna ska klara av, både vad gäller höjden på ojämnheten och den andel av tårtans bredd eller diameter som ska sticka ut utanför kanten vid beräkningen.

Det är viktigt att poängtera att den presenterade beräkningsmodellen endast utgör ett av väldigt många tänkbara scenarion, och att den är en förenkling av verkligheten. Exempelvis bortses friktionen mellan tårtan och underlaget, som teoretiskt är av betydelse för tårtans benägenhet att glida i samband med rörelsen. I en eventuell fortsatt process med att förfina modellen kan flera parametrar tas i beaktning, så att modellens giltighet kan utökas till att gälla under fler förhållanden. Exempelvis föreslås en

utveckling av en modell som kan ta hänsyn till typ av underlag, för att bättre kunna simulera den instabilitet som råder för exempelvis snö eller jord.

Det ska också påpekas att beräkningsmodellen bygger på antagandet att rekylkraften som verkar på fyrverkeritårtan är konstant under hela den tid det tar för tårtans kant att nå underlaget, det vill säga när tårtans kant i figur 25 nått punkten B. Kraften måste vara tillräckligt stor, eller verka under tillräcklig lång tid för att tårtans kant ska nå underlaget. Figurerna i bilaga C visar emellertid att den uppmätta rekylkraften inte är konstant över tiden. Den kraft som använts för beräkning av medelvärdet av rekylkraften, det vill säga toppen på kurvan, varar bara under mycket kort tid.

I figur 28 görs en jämförelse mellan uppmätt rekylkraft och den kraft som används i beräkningsmodellen. Diagrammet visar kraft som funktion av tid, vilket innebär att arean under grafen är den impuls som tillförs fyrverkeritårtan. Det framgår tydligt i figuren att denna impuls överskattas i denna testmetod, vilket kan få till följd att en tårta som beräknats välta under vissa omständigheter ändå inte välter. Detta på grund av att impulsen i själva verket är för liten för att sätta tårtan i så pass mycket rotation att kanten når underlaget. Därmed kan modellen anses vara konservativ i detta avseende.



Figur 29 – Kraft som funktion av tid. Impulsen (arean under grafer) överskattas för beräkningsmodellen.

Vidare innebär detta att man i det omvända fallet, när en tårtas geometri är given och tillåten mängd svartkrut ska beräknas, kommer underskatta vilken impuls och således kraft som krävs för att välta tårtan. Eftersom de verkliga kraftkurvorna ser ut som den blåmarkerade i figuren, kommer medelvärdet av en sådan kurva att ligga långt under toppvärdet, som ju är den kraft som enligt modellen krävs för att tårtan ska välta. Eftersom den framräknade kraften är konstant kommer den kraft som behövs i verkligheten behöva vara större för att samma impuls ska nås. Modellen anses därför vara konservativ även i detta avseende.

Det kan även diskuteras vad som kan anses vara det värsta fallet i fråga om när, efter antändning, en fyrverkeritårta välter. Eftersom beräkningar visat att en fyrverkeritårtas tyngdpunkt inte förändras i någon större utsträckning när skott avfyras, har beräkningsmodellen utvecklats efter tanken att det mest kritiska läget är när en fyrverkeritårta välter redan efter första skottet. Detta eftersom den i detta läge har flest skott kvar att skjuta, och således har störst skadepotential. Emellertid kan det ändå vara intressant att kunna studera andra typer av fall, när antalet kvarvarande skott är ett annat.

Känslighetsanalysen av beräkningsmodellen visar att höjden på ojämnheten är av mycket stor betydelse för välthet. Detta är en indikation på att en standardisering av testmetoden är nödvändig innan den kan tas i bruk. När parameter a studeras i känslighetsanalysen, det vill säga avståndet mellan kraften och fyrverkeritårtans sida, förutsätts att kraften inte verkar på tårtan efter det att tårtans kant

nått marken. Detta på grund av förenklingen att beräkningsmodellen inte räknar med något motverkande vridmoment från kraften kring momentpunkt B.

Valideringen av beräkningsmodellen visade att denna i vissa fall kan ses som verklighetstrogen, men att den dock har begränsad giltighet. Därför är det viktigt att i den fortsatta utvecklings- och valideringsprocessen arbeta för att bredda omfattningen av modellens giltighet.

8 Slutsats

Vid arbetet med förstudie och framtagande av metod för testning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet har följande slutsatser dragits:

- Olyckor sker trots att rekommendationer för handhavande följs. Behov finns av en metod för undersökning av vältningsbenägenhet som enskild faktor.
- Testmetoden som tagits fram kan efter validering, utveckling och standardisering användas för testning av fyrverkeritårtors vältningsbenägenhet.
- För mätning av rekylkraft och projektilhastighet krävs relativt avancerad utrustning.
- Vid mätning av en fyrverkeritårtas rekylkraft bör mätningar ske på enskilda bombrör.
- Rekommenderade säkerhetsavstånd understiger de testade fyrverkeritårtornas maximala skjutlängd.
- Svensk statistik på området anses vara bristfällig och bör kompletteras för att åstadkomma en tillfredsställande bild över skademönster och -potential.

9 Förslag till fortsatta studier

Med utgångspunkt på det material som tagits fram i denna rapport ges i detta avsnitt förslag till fortsatta studier inom området. Dessa är:

- Framtagande av ett mer detaljerat statistiskt underlag gällande fyrverkerier och fyrverkerirelaterade olyckor för att möjliggöra vidare undersökning av fyrverkeriers skademönster under rådande förhållanden i Sverige.
- Fortsatt studie av fyrverkeriers skadeverkan på människor och bebyggelse.
- Utredning av huruvida parametrar i de bortprioriterade försöken kan studeras vidare, antingen genom befintlig försöksupställning eller efter revidering av respektive sådan.
- Översyn av mätmetoden som föreslås i rapporten, i syfte att förfina denna.
- Fortsatt utveckling och validering av beräkningsmodellen. I en eventuell fortsatt process med att förfina modellen kan flera parametrar tas i beaktning, så att modellens giltighet kan utökas till att gälla under fler förhållanden.
- Standardisering av de parametrar i beräkningsmodellen som inte berör fyrverkeritårtans egenskaper.

10 Referenser

Aftonbladet (2008 A). *Lillebro träffades i pannan*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.aftonbladet.se/nyheter/article11320571.ab>> (2012-11-25)

Aftonbladet (2008 B). *Skadades av fyrverkerier – dog*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.aftonbladet.se/nyheter/article11322190.ab>> (2012-10-12)

Consumer Product Safety Commission (1994) *Multiple Tube Mine and Shell Fireworks Devices: Advance Notice of Proposed Rulemaking; Request for Comments and Information*. (Elektronisk)

Tillgänglig 2012-11-24 <<http://www.cpsc.gov/BUSINFO/frnotices/fr94/94-33928.html>>

Dagens nyheter (2012). *Raketskadad pojke miste sitt ben*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.dn.se/nyheter/sverige/raketskadad-pojke-miste-sitt-ben>> (2012-10-14)

Donner J (1997) *A Professional's Guide to Pyrotechnics: Understanding and Making Exploding Fireworks*, Colorado: Paladin Enterprises, Inc.

Hall J R (2012) *Fireworks*. Quincey, MA: National Fire Protection Association.

Helsingborgs Dagblad (2010). *En skadad av raket på nyårsnatten*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://hd.se/skane/2011/01/01/lugnt-firande-under-tidiga/>> (2012-10-12)

ISD Scotland (2007) *DTI Fireworks Injuries Survey 2005*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.isd.scot.nhs.uk/isd/956.html>> (2012-11-09)

Klason, L-G. Johansson, N. (2011) *Fyrverkeripjäser som antändning vid bränder*, Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Kristianstadsbladet (2011) *Fyrverkeripjäs återkallas efter olycka*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.kristianstadsbladet.se/kristianstad/article1595722/Fyrverkeripjas-aterkallas-efter-olycka.html>> (2012-10-12)

MSB (2012 A). *Frågor och svar om fyrverkerier*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<https://www.msb.se/sv/Forebyggande/Brandfarligt--explosivt/Fyrverkerier/Fragor--svar/>> (2012-11-23)

MSB (2012 B). *IDA – MSB:s statistik- och analysverktyg*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://ida.msb.se/ida2#page=a0087>> (2012-11-19)

MSB (2011). *Skadestatistik och fyrverkerier*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<https://www.msb.se/sv/Forebyggande/Brandfarligt--explosivt/Fyrverkerier/Skadestatistik/>> (2012-11-23)

MSB (2010 A). *Formal objection from Sweden to standard EN 15947, pyrotechnic articles – Fireworks,*

Categories 1, 2 and 3. (Elektronisk) Tillgänglig:

<<https://www.msb.se/Upload/Om%20MSB/Arkiv%20remissvar/Formal%20objection%20from%20Sweden%20to%20standard%20EN%2015947.pdf>> (2012-11-23)

MSB (2010 B). *Föreskrifter om pyrotekniska artiklar*, Karlstad.

MSB (2010 C). *Riktlinjer för säkerhetsavstånd för olika typer av fyrverkeriartiklar*. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<https://www.msb.se/sv/Forebyggande/Brandfarligt--explosivt/Fyrverkerier/Godkannande/Provskjutning-hos-testinstitut/>> (2012-10-31)

Russell M S (2009) *The Chemistry of Fireworks: 2nd Edition*, Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

Räddningsverket (2006) *Godkännande av fyrverkeriprodukt*, Karlstad.

Society of Fire Protection Engineers (2002) *The SFPE handbook of fire protection engineering*, 3rd ed.

Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002.

Svea Fireworks (2012). (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://www.sveafireworks.com/se/information/definition.asp#font>> (2012-10-04)

Sveriges Radio (2002). Dödlig fyrverkeriolycka. (Elektronisk). Tillgänglig:

<<http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=83&artikel=32310>> (2012-10-12)

SVT (2012 A). *Kamp om ersättning för farligt fyrverkeri*. (Elektronisk) Tillgänglig

<<http://www.svt.se/plus/artiklar/kamp-om-ersattning-for-livsfarligt-fyrverkeri>> (2012-11-25)

SVT (2012 B). *Så svarar försäkringsbolaget*. (Elektronisk) Tillgänglig

<<http://www.svt.se/plus/artiklar/vandning-fran-forsakringsbolaget>> (2012-11-25)

Tu Y., Granados D V. (2010-2012) *Fireworks-Related Deaths, Emergency Department-Treated Injuries, and Enforcement Activities During 2009/2010/2011*. U.S Consumer Products Safety Commission.

U.S. Fire Administration (2011) <http://www.usfa.fema.gov/citizens/focus/fireworks.shtm>

Tillgängligt 2012-11-13

Östran (2009). Träffade av raketer. (Elektronisk). Tillgänglig:

<http://www.ostran.se/NYHETER/Oeland/traeffade_av_raketer> (2012-10-12)

Bilaga A Klassificering av fyrverkerier

För att säkerställa att de fyrverkeripjäser som finns tillgängliga på marknaden håller väsentligt god kvalitet med avseende på funktion och säkerhet, har MSB tagit fram Föreskrifter om pyrotekniska artiklar (MSB, 2010 B), vilka innehåller de krav som pyrotekniska artiklar ska uppfylla innan de släpps ut på marknaden.

Fyrverkerier delas in i följande fyra olika kategorier med avseende på användning, syfte, risknivå och ljudnivå (MSB, 2010 B):

Kategori 1

Fyrverkerier med mycket låg risknivå och försumbar ljudnivå avsedda för användning inom avgränsade områden, inklusive fyrverkerier avsedda för användning inne i bostäder.

- Säkerhetsavstånd: minst 1 meter
- Maximal ljudnivå: 120 dB vid säkerhetsavståndet
- Kategori 1 ska inte omfatta smällare, knallskottsliknande smällare eller fyrverkeritårtor bestående av smällare eller knallskottsliknande smällare.
- Ryska smällare i kategori 1 får inte innehålla mer än 2,5 mg silverfulminat.

Kategori 2

Fyrverkerier med låg risknivå och låg ljudnivå avsedda för användning utomhus inom avgränsade områden.

- Säkerhetsavstånd: minst 8 meter
- Maximal ljudnivå: 120 dB vid säkerhetsavståndet

Kategori 3

Fyrverkerier med medelhög risknivå avsedda för användning utomhus inom stora öppna områden. Ljudnivån hos dessa artiklar får inte vara skadlig för människors hälsa.

- Säkerhetsavstånd: minst 15 meter
- Maximal ljudnivå: 120 dB vid säkerhetsavståndet

Kategori 4

Fyrverkerier med hög risknivå avsedda att användas endast av personer med specialistkunskaper (vanligen kallade ”fyrverkerier för professionell användning”) och vars ljudnivå inte är skadlig för människors hälsa.

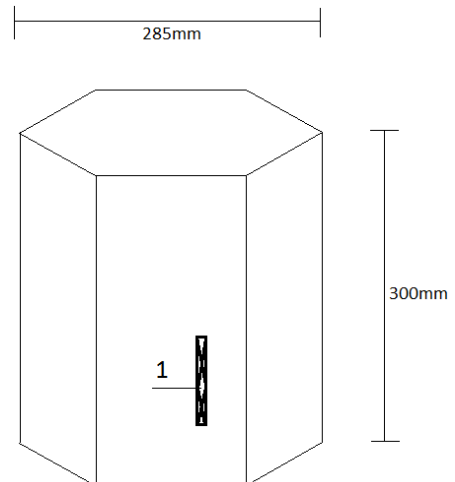
Enligt föreskrifterna får dessutom fyrverkerier inte röra sig på ett oberäkneligt eller oförutsägbart sätt. Vältning är ett sådant exempel, som även visat sig vara ett återkommande problem bland fyrverkeritårtor.

Bilaga B Testade tårtors konstruktion

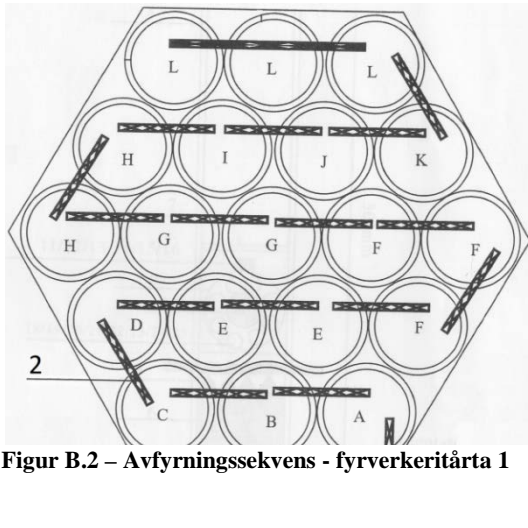
Vid försöken används två typer av fyrverkeritårter, innehållande 19 respektive 25 skott. I detta avsnitt presenteras detaljerad information om respektive tårta, samt schematisk skiss över respektive tårtas konstruktion. Bilderna i denna bilaga är reproducerade med tillstånd.

B.1.1 Fyrverkeritårta 1

Fyrverkeritårta 1 är den mindre av de två tårtor som används vid försöken. Tårtan innehåller 19 skott, där de huvudsakliga effekterna utgörs av stjärnexplosioner och eldbägare. Tårtan är sexkantig med en maximal bredd på 285 mm och en höjd på 300 mm, se figur B.1.



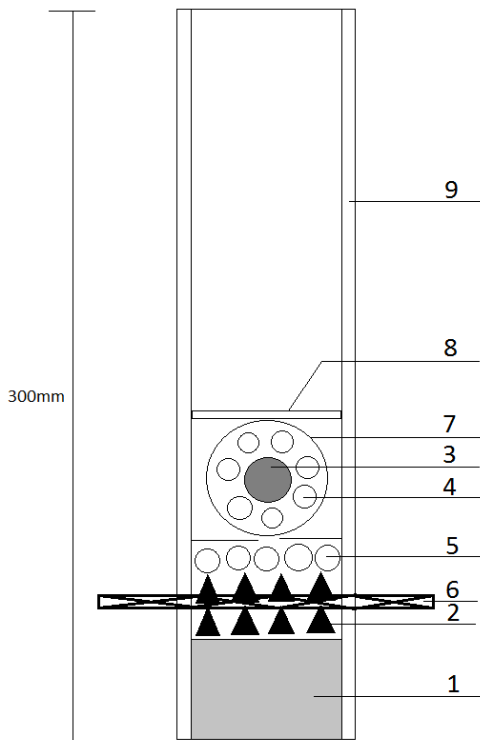
Figur B.1 – Schematisk skiss - fyrverkeritårta 1



Figur B.2 – Avfyrningssekvens - fyrverkeritårta 1

Figur B.2 illustrerar avfyrningssekvens för fyrverkeritårta 1.

1. Antändningsstubin
2. Sammankopplande stubinråd



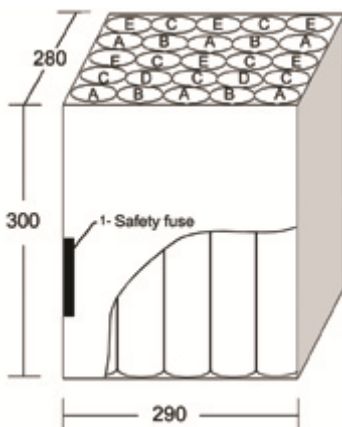
Figur B.3 – Genomskäring av bombrör - fyrverkeritårta 1

Figur B.3 illustrerar genomskäring av ett bombrör i fyrverkeritårta 1. Skotten som skjuts upp i luften har formen av en kula, innehållande separationsladdning omgiven av den kemikalieblandning som utgör själva effekt-laddningen. Vissa av bombrören innehåller även en så kallad strobe-effekt-laddning, se punkt 5, vilket genererar gnistor då skottet skjuts iväg. I botten på bombröret sitter en lerplugg på vilken drivladdningen, det vill säga svartkrutet, vilar.

1. Lerplugg
2. Drivladdning
3. Separationsladdning
4. Effekt-laddning
5. Strobe-effekt-laddning
6. Stubintråd
7. Skott
8. Papplock
9. Bombrör i papp

B.1.2 Fyrverkeritårta 2

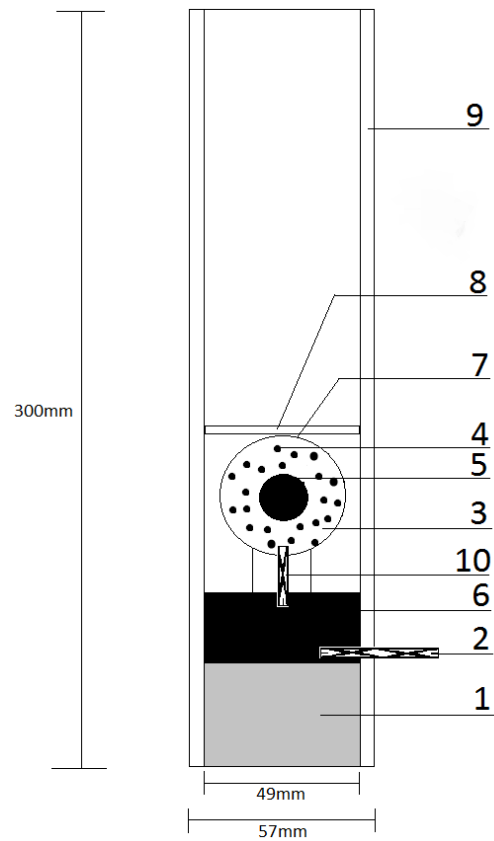
Fyrverkeritårta 2 är något större än fyrverkeritårta 1. Tårtan innehåller 25 skott, där de huvudsakliga effekterna utgörs av stjärnexplosioner och silverblinkeffekter. Tårtan är rektangulär med en sida på 280 mm respektive 290 mm, och med en höjd på 300mm, se figur B.4.



Figur B.4 – Schematisk skiss – fyrverkeritårta 2

Figur B.5 illustrerar genomskärning av ett bombrör i fyrverkeritårta 2. Skotten som skjuts upp i luften har formen av en kula, i mitten av vilken det sitter en strobe-effektladdning omgiven av de kemikalieblandningar som utgör separationsladdning samt ytterligare effektladdning. I botten på bombröret sitter en lerplugg på vilken drivladdningen, det vill säga svartkrutet, vilar. Principskissen är densamma för samtliga bombrör i tårten, oavsett vilken typ av effektladdning skottet är utrustat med.

1. Lerplugg
2. Stubintråd
3. Separationsladdning
4. Effektladdning
5. Strobe-effektladdning
6. Drivladdning
7. Skott
8. Papplock
9. Bombrör i papp
10. Fördröjningsstubin



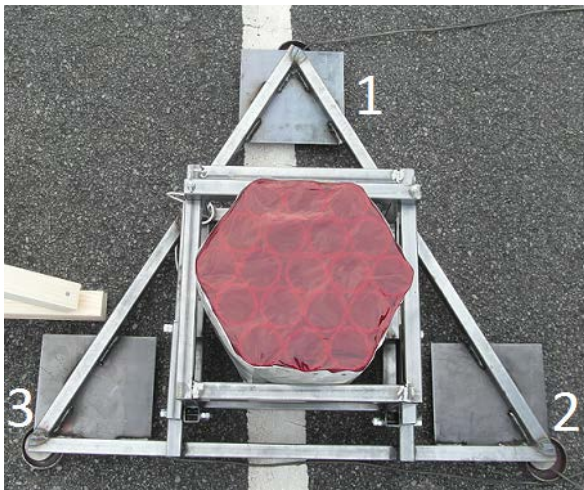
Figur B.5 – Genomskärning av bombrör - fyrverkeritårta 2

Bilaga C Resultat från försök

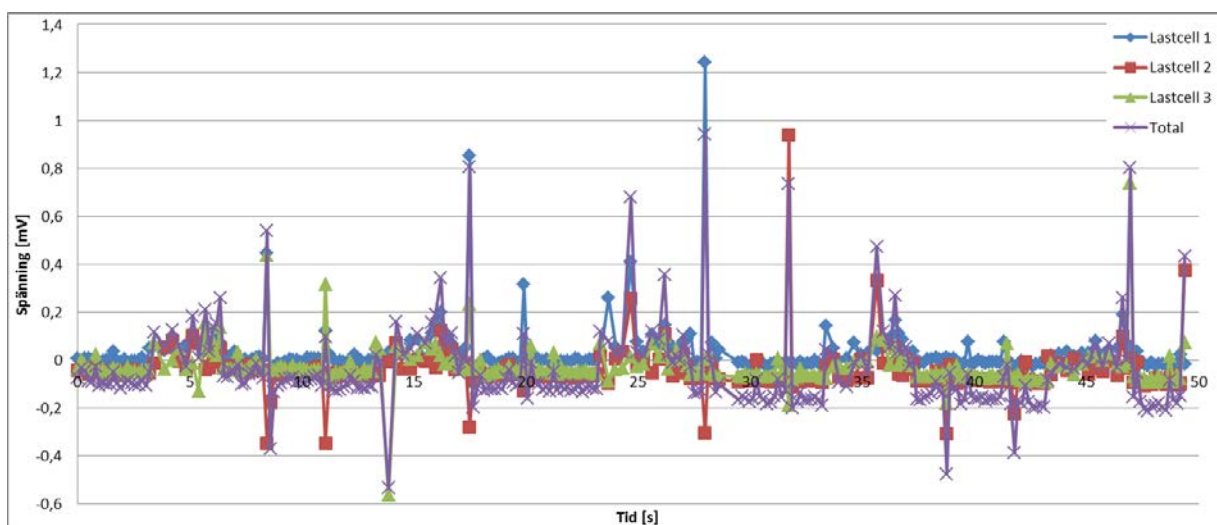
I denna bilaga presenteras detaljerade resultat från de försök som utfördes, beskrivna i avsnitt 4.2. I figurerna i denna bilaga återges kraftmätningen som den spänning i millivolt som lastcellerna gav. Kraften i newton räknades fram med en faktor 100, som ansågs vara en godtagbar avrundning i förhållande till testernas noggrannhet. Lastcellerna, matade med tolv volt, gav en signal på 0 – 24 millivolt som motsvarade 0 – 250 kg belastning, det vill säga en millivolt motsvarade 10,42 kg. För enkelhetens skull räknades den omvandlingen med en faktor tio, likaså omvandlingen från kilogram till newton, vilket gav en faktor 100 från millivolt till newton.

C.1 Försöksomgång 1

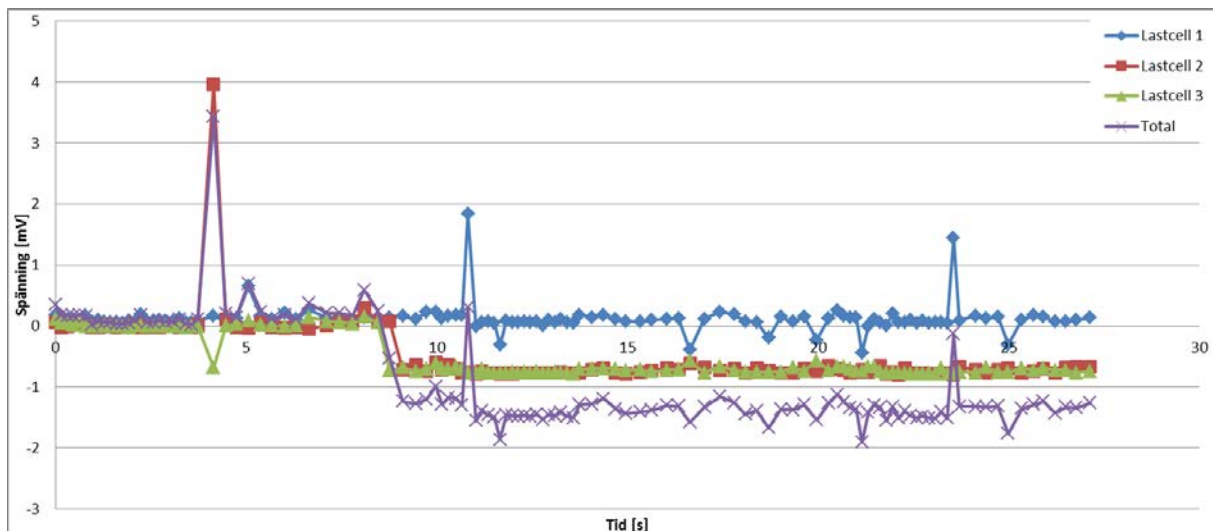
I detta avsnitt presenteras den utdata som erhöles vid försöksomgång ett, se figur C.2 – C.7. I figur C.1 framgår placering och numrering av lastcellerna. Mätvärdena har anpassats för att hamna runt noll vid viloläge och därefter adderats för att få total kraft. Eftersom mätvärden även från försök 5 och 6 erhöles presenteras de nedan, trots att de inte används vidare i studien.



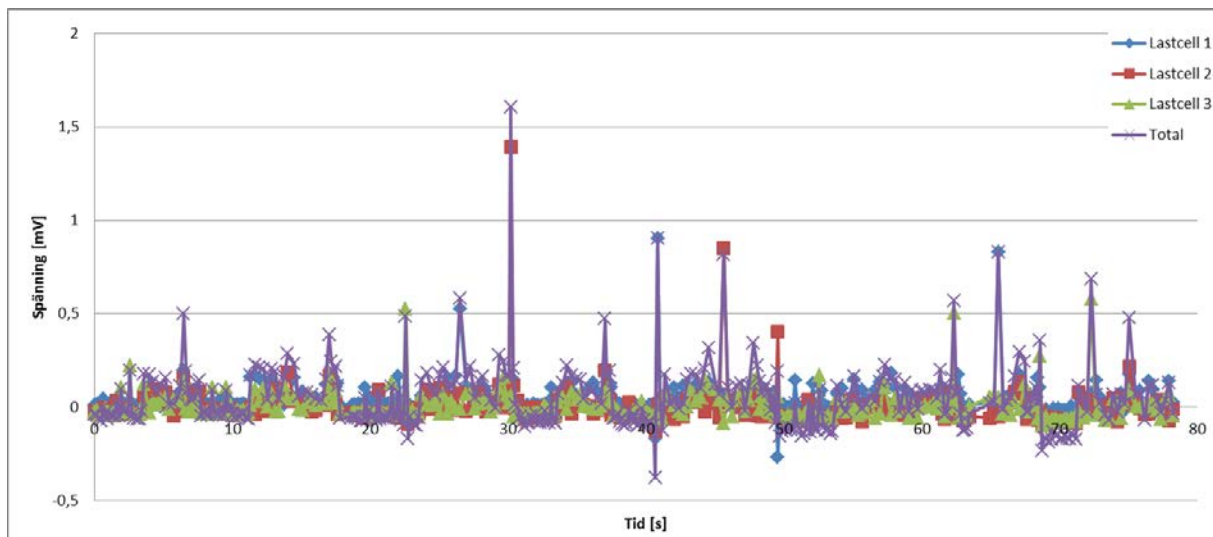
Figur C.30 – Lastcellernas placering och numrering



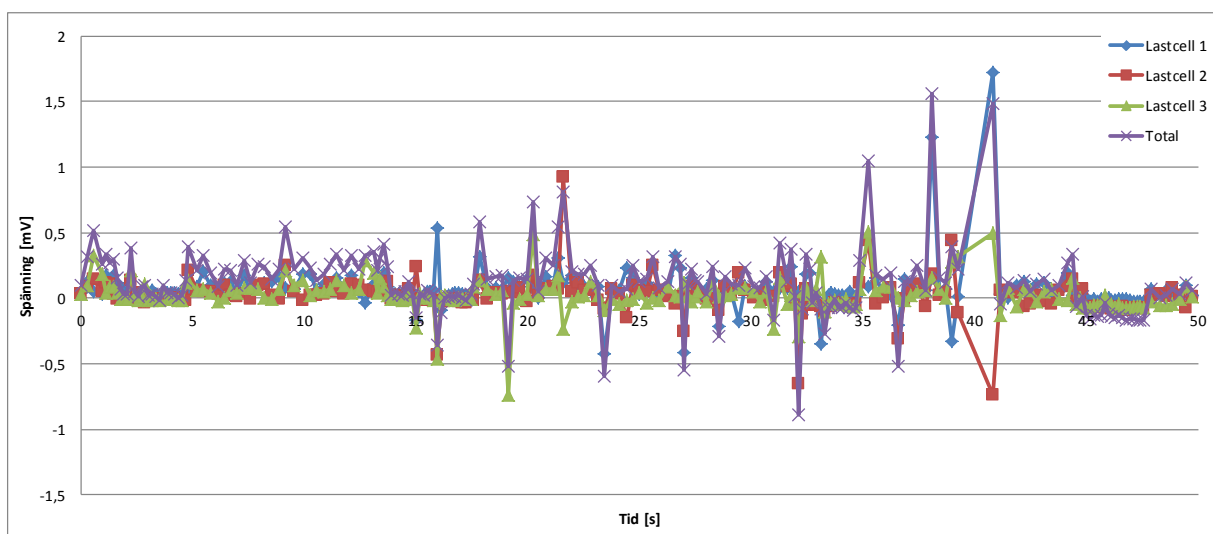
Figur C.31 – Mätdata från försök 1



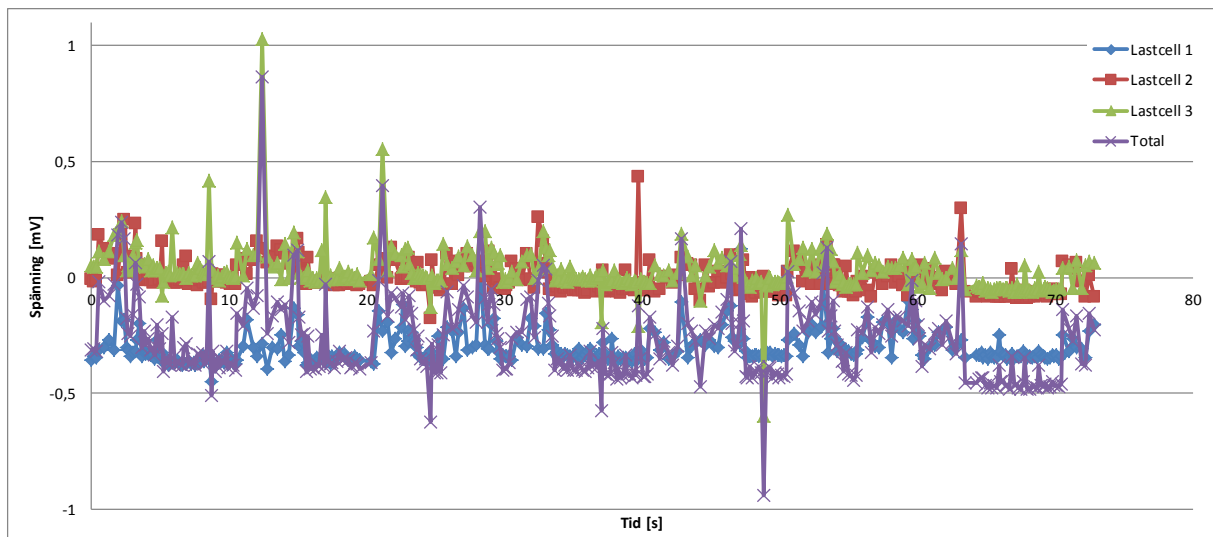
Figur C.32 – Mätdata från försök 2



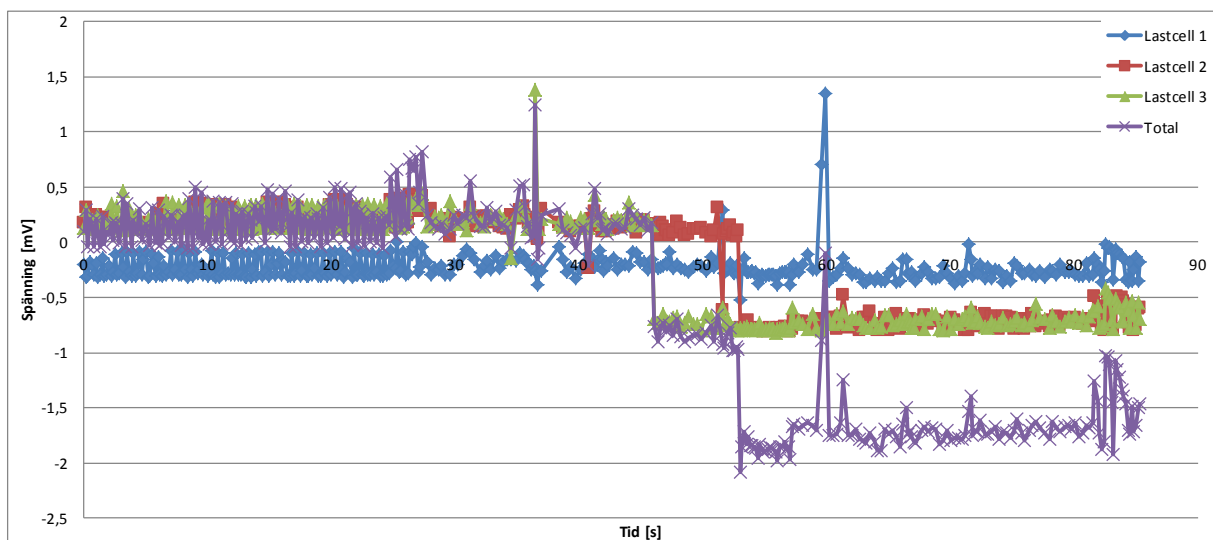
Figur C.33 – Mätdata från försök 3



Figur C.34 – Mätdata från försök 4



Figur C.35 – Mätdata från försök 5



Figur C.36 – Mätdata från försök 6

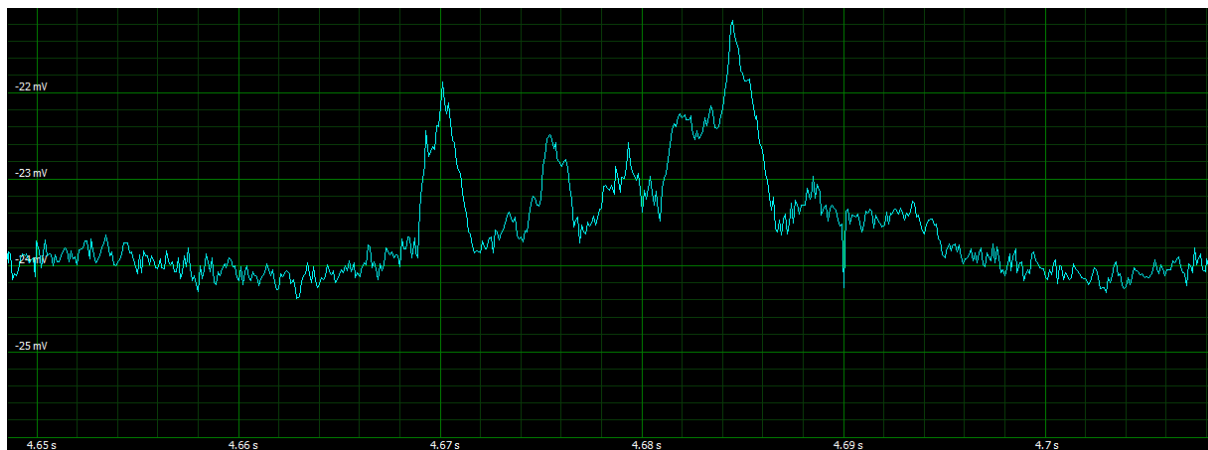
I diagrammen kan avläsas att det totala värdet ibland blir negativt, det vill säga att den totala kraften som påverkar lastcellerna är mindre än när endast ställningen och tårtan var i vila. Detta skulle betyda att hela systemet skulle ha lättat från lastcellerna, vilket anses vara föga troligt. Det kan även utläsas att antal toppvärden inte stämmer överens med antal skott per tårta, det vill säga 19 respektive 25 skott. Detta beror troligen på att samplingsfrekvensen varit för långsam och att några av de mycket kortvariga kraftökningarna skett mellan två mätpunkter.

I diagrammen kan en svag lutning av punkterna i vila anas, vilket troligen beror på att tårtornas massa minskat i takt med att svartkrut förbränts och skott har skjutits iväg. I figur C.3 och C.7 kan tydligt utläsas hur ställningen föll av två lastceller under försöket.

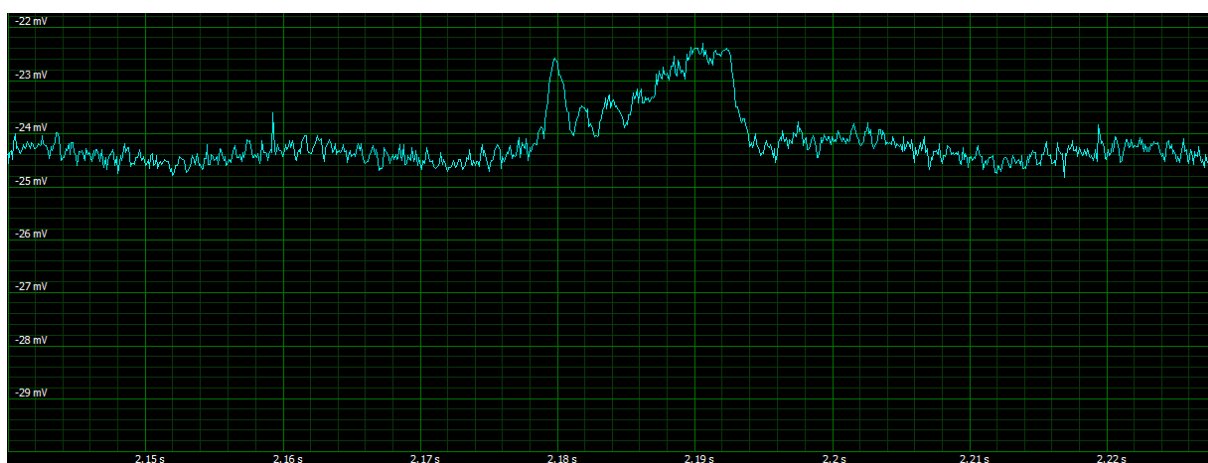
C.2 Försöksomgång 2

I detta avsnitt presenteras den utdata som erhöles vid försöksomgång 2, se figur C.8 – C.24, där uppmätt spänning i millivolt visas på y-axeln och tiden i sekunder visas på x-axeln. Vid försöksomgång 2 användes annan utrustning för datainsamling än vid försöksomgång 1, vilket förklarar att diagrammen ser annorlunda ut. Eftersom programmet som användes för datainsamling skapade diagrammen direkt vid insamling redovisas de oredigerade, det vill säga att de inte har

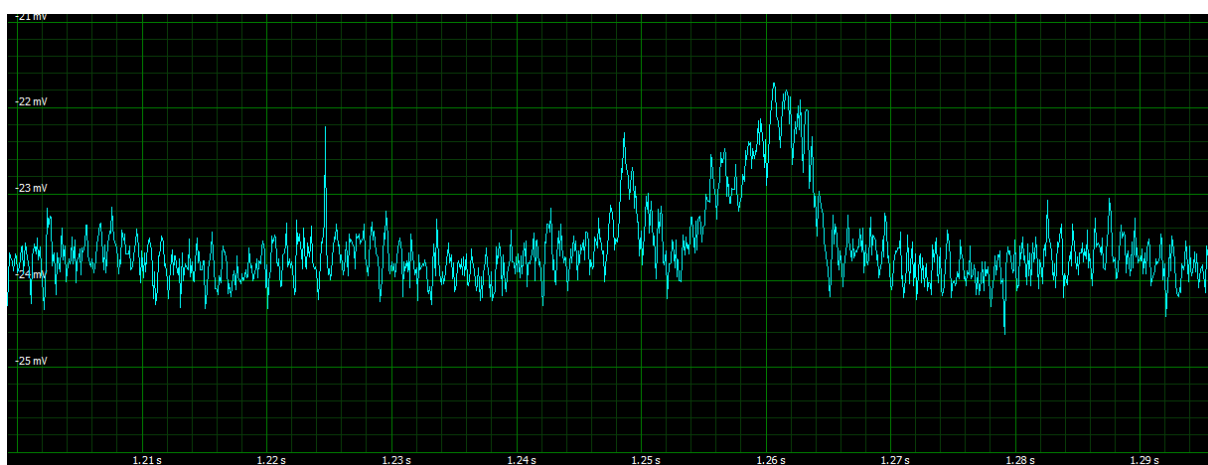
”nollats” vid vila. Detta har dock ingen betydelse eftersom det enbart är förändringen i y-led som är intressant. De värden på rekylkraftkraft som är redovisade i tabell 4 är ur diagrammen uppskattade värden på maximal kraft, omräknat från millivolt enligt ovan. Krafterna varar under ett tiotal millisekunder och fluktuerar kraftigt. Dessa aspekter tas ej hänsyn till, då tidsperioden är mycket kort, samt då det maximala värdet anses vara det mest intressanta att beakta.



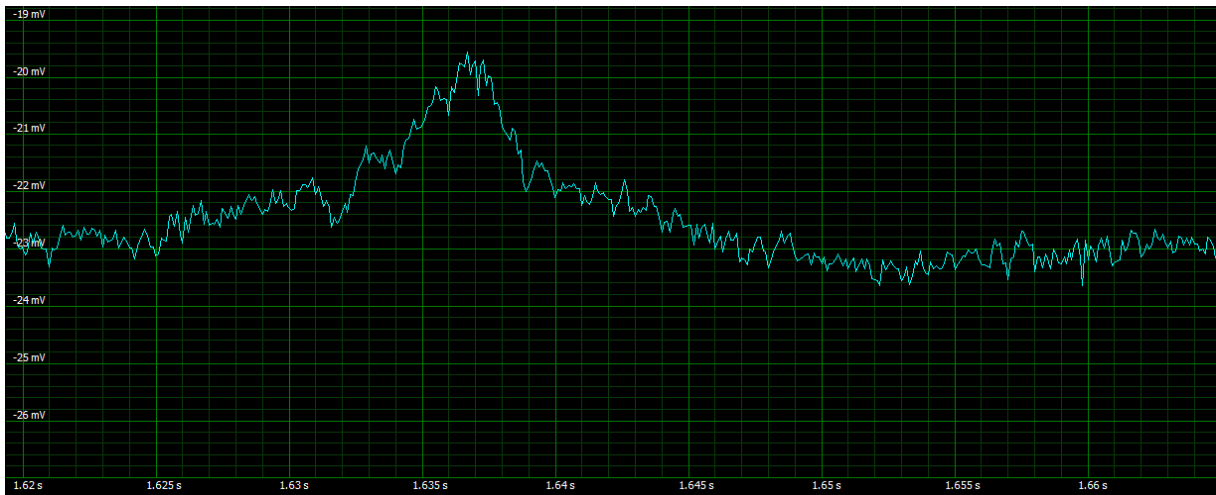
Figur C.37 - Mätresultat från uppåtriktat försök 1



Figur C.38 - Mätresultat från uppåtriktat försök 2



Figur C.39 - Mätresultat från uppåtriktat försök 3



Figur C.40 - Mätresultat från uppåtriktat försök 4



Figur C.41 - Mätresultat från uppåtriktat försök 5



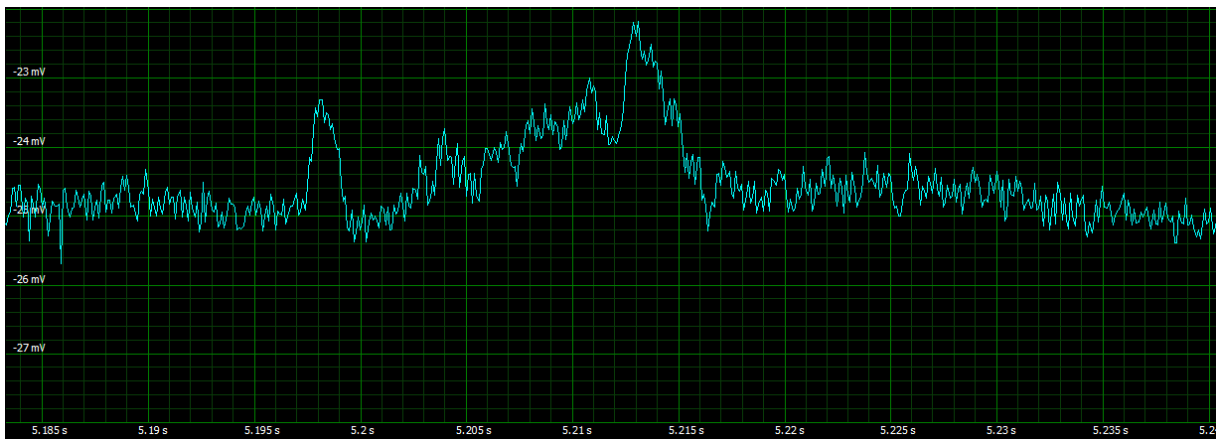
Figur C.42 - Mätresultat från uppåtriktat försök 6



Figur C.43 - Mätresultat från uppåtriktat försök 7



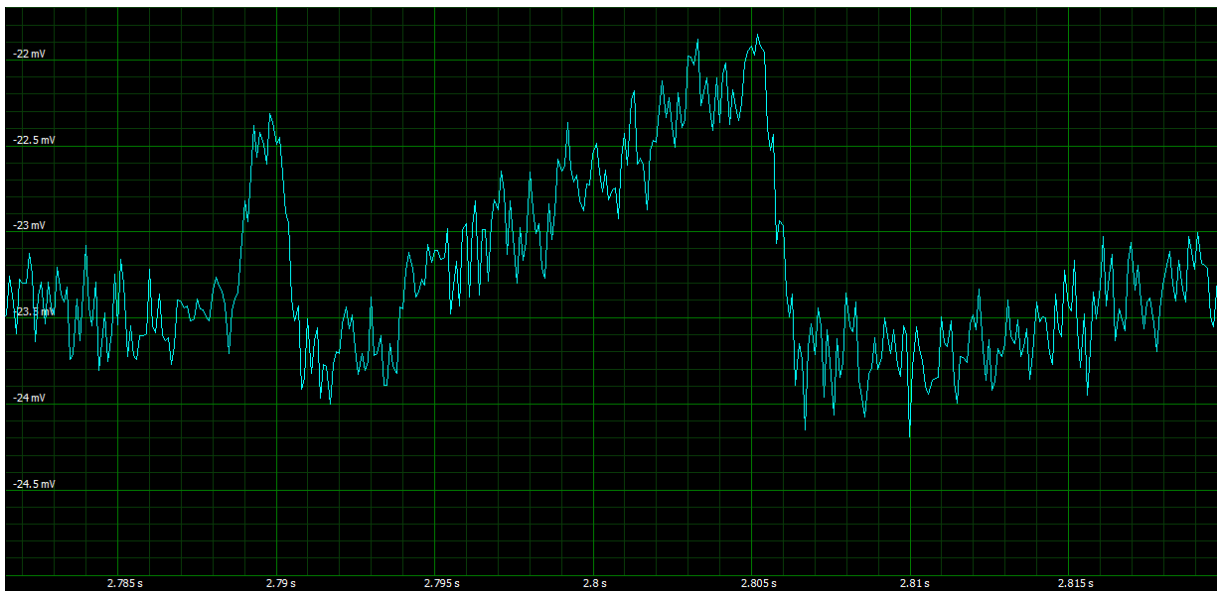
Figur C.44 - Mätresultat från uppåtriktat försök 8



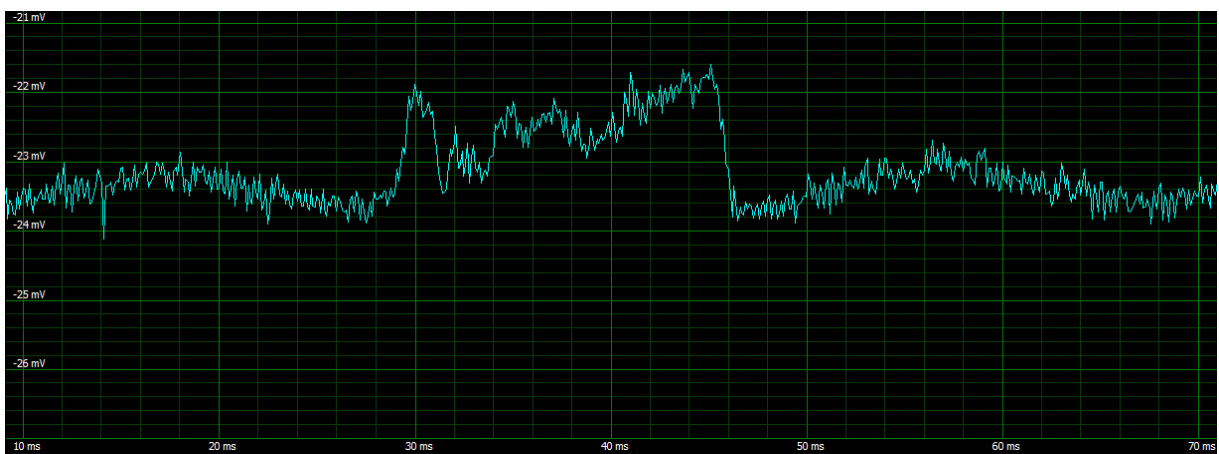
Figur C.45 - Mätresultat från uppåtriktat försök 9



Figur C.46 - Mätresultat från uppåtriktat försök 10



Figur C.47 - Mätresultat från uppåtriktat försök 11



Figur C.48 - Mätresultat från uppåtriktat försök 12



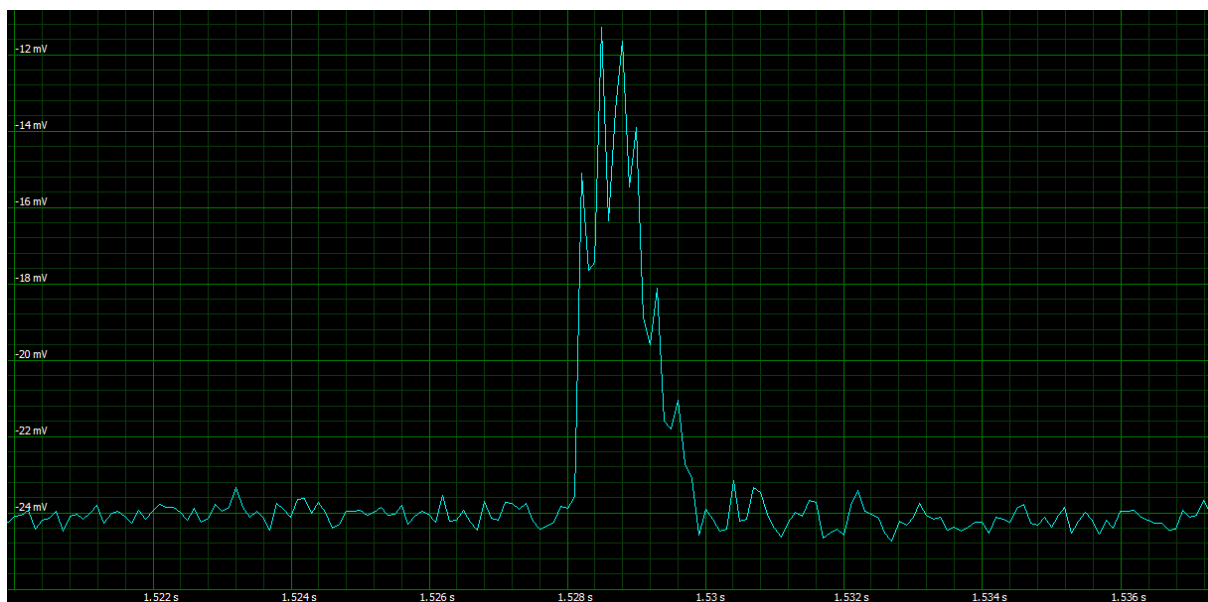
Figur C.49 - Mätresultat från uppåtriktat försök 13



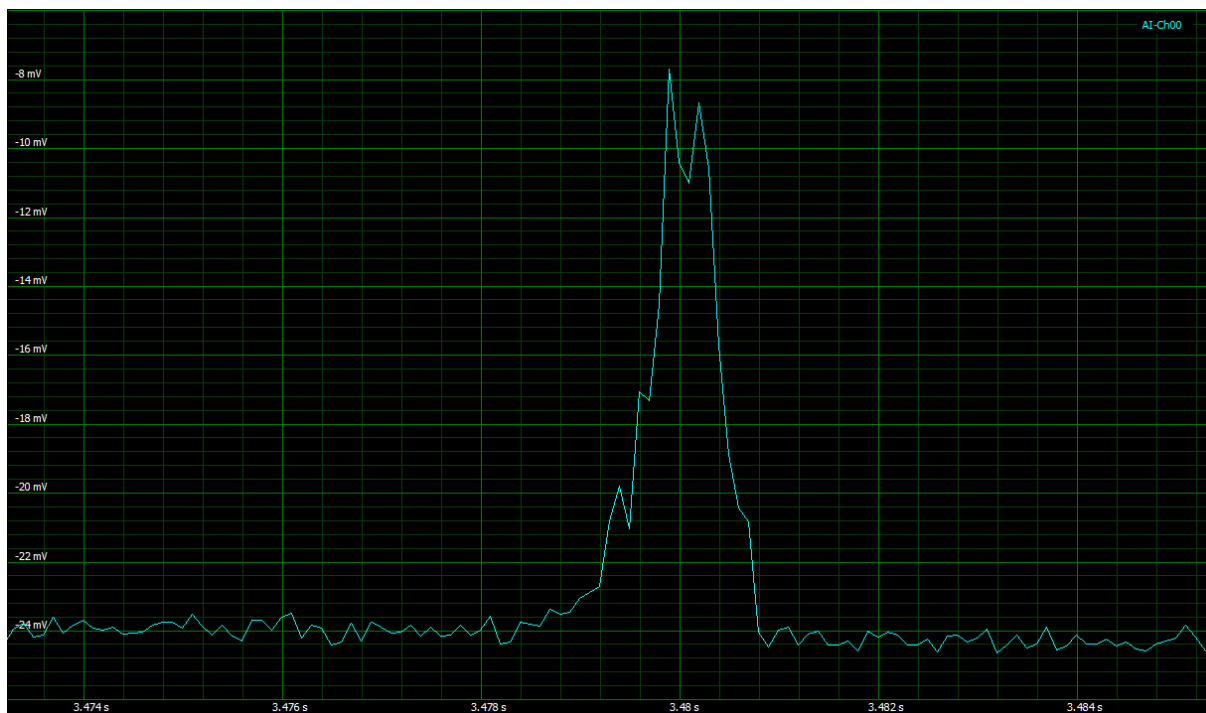
Figur C.50 - Mätresultat från nedåtriktat försök 1



Figur C.51 - Mätresultat från nedåtriktat försök 2



Figur C.52 - Mätresultat från nedåtriktat försök 3



Figur C.53 - Mätresultat från nedåtriktat försök 4

Diagrammen som bildats är betydligt tydligare och mer detaljerade än de från försöksomgång 1, vilket var förväntat då högre samlingsfrekvens användes. Med den höga detaljrikedomen syns att hela rekylkraftförloppet registrerats vid mätningarna.

I vissa diagram kan utläsas att kraften har en mindre topp först för att sedan stiga igen till en ny, ofta större, topp. Detta skulle kunna reflektera hur först drivladdningen antänds och sedan bygger upp ett tryck som är maximalt precis innan effektladdningen lämnar mynningen och trycket sedan faller, likt kraftkurvorna. I diagrammen från de nedåtriktade försöken syns inte detta fenomen, då det snarare handlar om en anslagskraft än en rekylkraft. Där har dock vissa toppvärden en liten fluktuation, något som även visade sig vid förberedelsestesterna med hammarslag¹¹.

I tabell C.1 visas den tid under vilken kraften verkade för de nedåtriktade försöken.

¹¹ Samtal med Anders Sjöström, Avdelningen för Teknisk Akustik, Lunds Tekniska Högskola. 2012-11-05.

Tabell C.2 – Tid då kraft verkar på lastcellen

Försök	Tid då kraft verkar [ms]
1	18
2	15
3	16
4	8
5	13
6	16
7	16
8	15
9	18
10	14
11	18
12	17
13	14
Medel	15

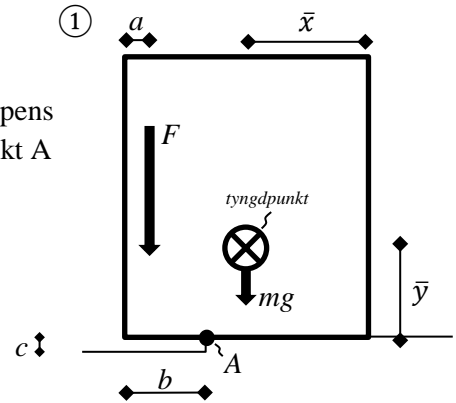
Bilaga D Fullständig beräkningsmodell

I denna bilaga ges en fullständig redogörelse för den beräkningsmodell som tagits fram i denna studie. Samtliga ingående parametrar samt de antaganden som ligger till grund för denna beräkningsmodell förklaras och grundas i gällande mekaniklagar som hämtats i *Mekanik – statik och dynamik* (Grahn & Jansson, 2002). Modellen delas in i tre steg, vilka förklaras nedan. Nomenklatur återfinns sist i denna bilaga.

Enligt lagen om rörelsemängdsmoment är summan av momenten kring en momentpunkt lika med masströghetsmomentet gånger kroppens vinkelacceleration. Om rekylkraften och dess vridmoment kring punkt A antas vara konstanta blir vinkelaccelerationen konstant och ges av:

$$F = \text{konstant}, \quad \ddot{A} = \text{konstant} \Rightarrow \alpha = \text{konstant}$$

$$\ddot{A}': \quad F(b - a) - mg(\bar{x} - b) =$$



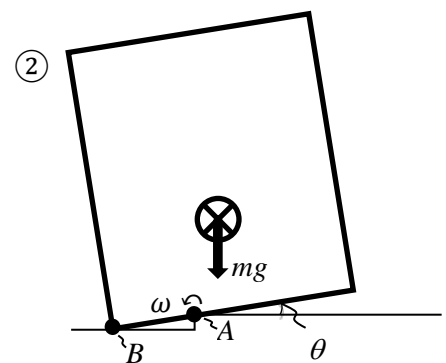
När kroppen har roterat vinkeln θ och hörnet nått punkten B kan vinkelhastigheten beräknas utifrån den kända vinkelaccelerationen. Avståndet b antas vara oförändrat.

① \rightarrow ②:

$$\frac{1}{2}(\omega^2 - \omega_0^2) = \alpha * \theta$$

Eftersom vinkelhastigheten i startögonblicket (ω_0) är noll fås

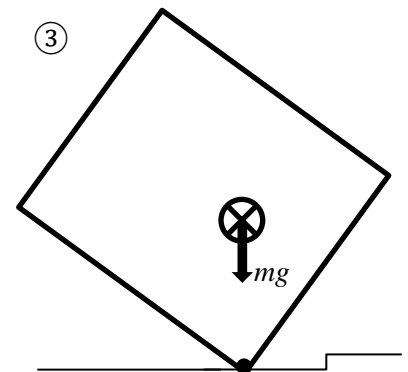
$$\begin{aligned} \omega^2 &= 2\alpha\theta = \frac{2\theta(F(b-a) - mg(\bar{x}-b))}{I} = \\ &= \frac{2 \sin^{-1}\left(\frac{c}{b}\right)}{I} * (F(b-a) - mg(\bar{x}-b)) \end{aligned}$$



I nästa steg, då kroppen roterar kring punkten B, måste dess rotationsenergi vara större än den ökning i lägesenergi som krävs för att kroppens tyngdpunkt ska hamna rakt ovanför denna punkt.

Detta kan beskrivas med ett energisamband, ur vilket ett villkor erhålls för hur stor denna rotationsenergi måste vara för att kroppen ska tippa över.

I modellen antas F inte ge något moment kring B, antingen



på grund av att rekyllkraften inte längre verkar i detta skede eller för att hävarmen är noll (om a är litet).

② → ③:

$$\text{Energi: } \frac{1}{2} I \omega^2 = mg \left(\sqrt{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} - (c + \bar{y}) \right)$$

=>

$$\sin^{-1} \left(\frac{c}{b} \right) * (F(b-a) - mg(\bar{x} - b)) = mg \left(\sqrt{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} - (c + \bar{y}) \right)$$

Som ett mått på om kroppen välter eller ej införs en vältningsfaktor (V_f), där vänsterledet i ekvationen ovan betecknas T och högerledet V .

$$V_f = \frac{\sin^{-1} \left(\frac{c}{b} \right) * (F(b-a) - mg(\bar{x} - b))}{mg \left(\sqrt{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} - (c + \bar{y}) \right)} = \frac{T}{V}$$

$V_f > 1 \Rightarrow$ vältning

Det ska även påpekas att friktionen mellan tårtan och underlaget bortsetts från i beräkningsmodellen.

D.1 Beräkningsexempel

$m = 9 \text{ kg}$, $F = 300 \text{ N}$, $\bar{y} = 0,15 \text{ m}$, $\bar{x} = 0,14 \text{ m}$, $c = 0,01 \text{ m}$, $b = 0,1 \text{ m}$, $a = 0$, $g = 10 \text{ m/s}^2$

$\Rightarrow V_f = 0,65 \rightarrow$ ej vältning

$c = 0,02 \text{ m} \Rightarrow V_f = 1,68 \rightarrow$ vältning

$c = 0,015 \text{ m} \Rightarrow V_f = 1,1 \rightarrow$ vältning

$c = 0,014 \text{ m} \Rightarrow V_f = 1,0 \rightarrow$ vältning

Om $b = 0,05 \text{ m}$:

$c = 0,02 \text{ m} \Rightarrow V_f = 0,90 \rightarrow$ ej vältning

$c = 0,025 \text{ m} \Rightarrow V_f = 1,68 \rightarrow$ vältning

D.2 Nomenklatur

A^{\wedge} vridmomentet kring punkt A [Nm]

a avståndet mellan rekyllkraften och fyrverkeritårtans sida [m]

b avståndet mellan tröskelkanten och fyrverkeritårtans sida [m]

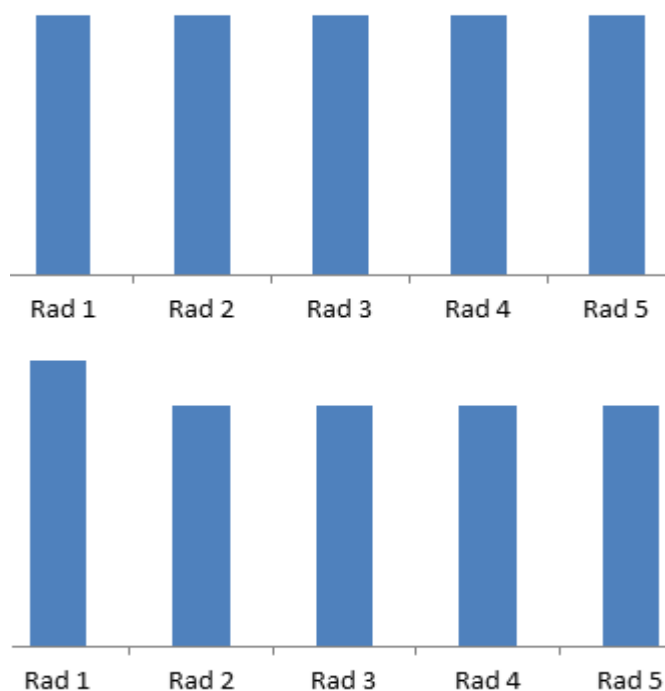
c tröskelhöjd [m]

F	rekylkraften [N]
g	tyngdaccelerationen [m/s^2]
I	masströghetsmomentet [kgm^2]
m	fyrverkeritårtans massa [kg]
T	tårtans rotationsenergi [J]
V	tårtans lägesenergi [J]
V_f	vältningsfaktorn [–]
\bar{x}	avståndet mellan fyrverkeritårtans sida och tyngdpunkt [m]
\bar{y}	avståndet mellan fyrverkeritårtans botten och tyngdpunkt [m]
α	vinkelaccelerationen [rad/s^2]
θ	rotationsvinkeln [rad]
ω	vinkelhastigheten [rad/s]

D.3 Förflyttad tyngdpunkt under avfyrning

För att illustrera hur tyngdpunkten förflyttas i sidled i takt med att skotten avfyras från fyrverkeritårtan presenteras följande exempel. En fyrverkeritårta betraktas av en godtycklig modell liknande fyrverkeritårta 2, med lika specifikationer eller i samma storleksordning.

Drivladdningen i varje bombrör utgörs av 6,6 g svartkrut och skotten väger omkring 50 g. Tårtan har 25 bombrör, placerade i rader om 5 skott. För varje rad som skjuts av försvinner alltså $5 * 56,6 = 283$ g av tårtans vikt. Om tårtan väger 9000 g, väger varje rad, det vill säga en femtedel av tårtan, från början 1800 g. Då $283/1800 \approx 0,16$ blir varje rad alltså endast 16 % lättare när dess fem skott skjutits av. När 20 skott avfyrats väger den sista raden 283 gram mer än de andra raderna. I förhållande till hela tårtans vikt, som nu är 7585 g, är detta mycket lite. Det kan således konstateras att denna lilla viktskillnad troligtvis har liten inverkan på viktfördelningen i tårtan och därmed förflyttningen av tyngdpunktens läge. Detta illustreras i figur D.1 nedan.



Figur D.154 – Illustration av fyrverkeritårtans viktfordelning från start och när 20 skott avfyrats. Staplarna symboliserar vikten av varje skottrad i tårtan.

D.4 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen har gjorts utifrån ett av beräkningsexemplen i avsnitt D.1, där vältfaktorn är 1. Tabell D.1 visar värdet för varje parameter i beräkningsexemplet samt de fördelningar som matats in i @Risk. Fördelningarna varierar med +/- 25 % kring värdena i exemplet. Undantaget är fördelningen för parameter a, som satts att variera mellan 0 – 2,5 cm eftersom detta anses vara rimliga gränser på hur centrum av kraften kan variera beroende på bombrörens diameter. Uniform fördelning har valts på grund av att känslighetsanalysen enbart gjorts i syfte att undersöka hur förändringar av ingående parametrar påverkar resultatet, utan någon information om vilka värden som kan antas mer troliga än andra.

Tabell D.3 – Indata till @risk

Parameter	Värde i beräkningsexempel	Fördelning
a	0 m	uniform(0;0,025)
b	0,1 m	uniform(0,075;0,125)
c	0,014 m	uniform(0,0105;0,0175)
F	300 N	uniform(225;375)
g	10	-
\bar{x}	0,14 m	uniform(0,105;0,175)
\bar{y}	0,15 m	uniform(0,1125;0,1875)

Referenser

Grahn R, Jansson P-Å. (2002) *Mekanik – statik och dynamik*. Lund: Studentlitteratur.

