

Påverkan på pilprojektiler av dynamiska skyddskomponenter som träffar projektilens mantelyta

Ewa Lidén, Olof Andersson, Anders Tjernberg



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Vapen och skydd
147 25 Tumba

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

Ewa Lidén, Olof Andersson, Anders Tjernberg

Påverkan på pilprojektiler av dynamiska skyddskomponenter som träffar projektilens mantelyta

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1785--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E2034
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Ewa Lidén Olof Andersson Anders Tjernberg	Projektledare Ewa Lidén	
	Godkänd av Patrik Lundberg	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Ewa Lidén	
Rapportens titel Påverkan på pilprojektiler av dynamiska skyddskomponenter som träffar projektilens mantelyta		
Sammanfattning Tillägsskydd som stör inkommande pilprojektiler innan de träffar ett fordon's grundskydd är ett viktseffektivt sätt att höja skyddsförmågan för lätta fordon. I denna studie har effekten av rörliga störobjekt i form av en eller flera cylindriska stänger som träffar projektilens mantelyta studerats. Störobjekten kastades mot projektilens sida med 200 respektive 600 m/s och träffade projektilen med 60° anslag dels i framänden, dels mitt på projektilen. Studien baserar sig på experiment med omvänd försöksteknik i liten skala kompletterat med kontinuumdynamiska simuleringar. För att projektilen, som rör sig med 2000 m/s, ska gå av till följd av anslaget krävdes hög hastighet på störobjektet. En cylindrisk stång som träffar projektilen med 200 m/s i sidan ger ungefär lika stor effekt på projektilen (viss snedställning men inga brott) som en motflygande plåt som träffar i samma hastighet och anslagsvinkel. Då hastigheten på stången ökades till 600 m/s erhöles brott på projektilen strax bakom islaget såväl vid anslag vid nosen som mitt på projektilen. För att brott skall uppträda då plåtar används som störobjekt krävs en ändrad rörelseriktning (medflygande plåt). Vid försöken med flera stänger var avsikten att projektilen skulle gå av i ett antal bitar vilket dock, av hittills outredd anledning, inte inträffade. Med hjälp av nya modeller och framtagna materialparametrar finns nu viss möjlighet att studera brott i slanka projektiler med hjälp av kontinuumdynamiska simuleringar.		
Nyckelord Dynamiska pansar, aktiva skyddskomponenter, pilprojektiler, brottsimulering		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 26s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Vapen och skydd 147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1785--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2005	Project no. E2034
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Ewa Lidén Olof Andersson Anders Tjernberg	Project manager Ewa Lidén	
	Approved by Patrik Lundberg	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Ewa Lidén	
Report title (In translation) Influence of side-impacting dynamic armour components on long rod projectiles		
Abstract Using add-on armour components to disturb long rod projectiles (LRP) before they hit the basic armour is a weight efficient way of increasing the protection of lighter vehicles. In this study, the effect of moving armour components, in the form of one or three cylindrical rods, hitting the side of the LRP, was investigated. The rods were hitting the side of the LRP at an angle of attack of 60 degrees. Rod velocities of 200 and 600 m/s and hitting points in the front and in the middle of the LRP were studied. The velocity of the LRP was 2000 m/s. The study is based on small scale reverse impact experiments and continuum dynamic simulations. To fragment the LRP, high rod velocities were needed. One rod hitting the LRP at 200 m/s gives approximately the same effect (some yaw but no fracture) as that of a moving oblique plate having the same velocity and angle of obliquity. Increasing the velocity of the rod to 600 m/s resulted in fracture of the LRP closely behind the hitting point both when hitting the front and the middle of the LRP. To obtain fracture of the LRP using plates the direction of the plate movement has to be changed (same direction as the projectile). The experiments with three rods were carried out to obtain multiple fractures but this did not occur. The reason for this is under investigation. Continuum dynamic simulations using new material models and parameters have reasonably successfully reproduced the experimental results giving us a numerical tool to study fracture of LRP.		
Keywords Dynamic armour, active armour components, long rod projectiles, fracture simulations		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 26p.	
Price acc. to pricelist		

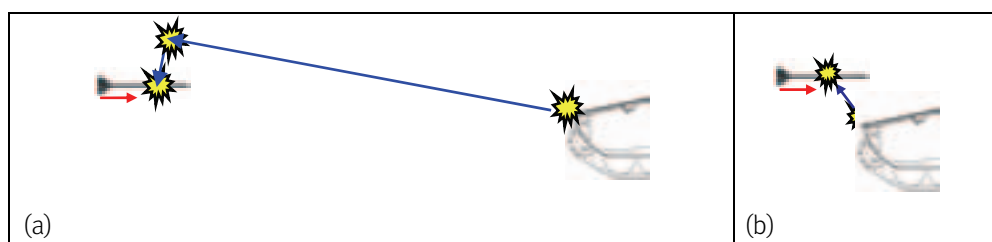
Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	7
2	EXPERIMENTELL METOD.....	9
3	SIMULERINGSMETOD	12
4	RESULTAT	13
4.1	ETT STÖROBJEKT	13
4.2	TRE STÖROBJEKT	16
5	DISKUSSION	19
6	SLUTSATS	20
7	REFERENSLISTA.....	21
1	APPENDIX I. VERIFIERING AV ANVÄND SIMULERINGSMODELL.....	22

1 Bakgrund

För att med rimlig vikt kunna skydda fordon mot pilprojektiler krävs någon form av tilläggsskydd som stör projektilen innan den når grundpansaret. Det vanligaste sättet att försöka störa projektilen är att påverka projektilen i spetsen med hjälp av, framför allt, tunna vinklade plåtar, antingen stationära med en luftspalt före nästa skyddslager, eller rörliga som kastas ut framför projektilen med hjälp av sprängämne eller elektricitet. Hur detta påverkar projektilen har tidigare studerats inom detta projekt [1-3].

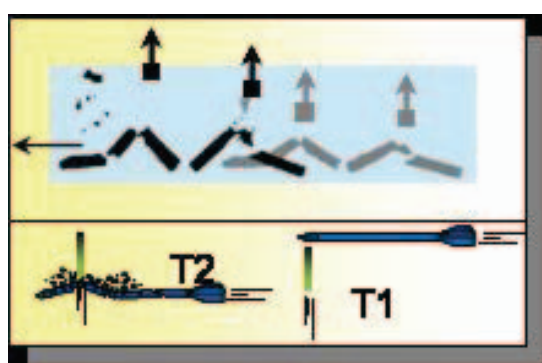
Ett alternativ till att angripa projektilen i nosen är att slå mot projektilens mantelyta. För att åstadkomma sådan verkan krävs någon form av sensor och antingen tvåstegsutskjutning av störellementet eller att tilläggsskyddet kan monteras långt från grundskyddet, se figur 1. Om störningen sker nära grundskyddet, som i alternativ b) i figur 1, måste störningen vara större eftersom både utspridning av fragment och rotation av projektilen kräver tid/avstånd.



Figur 1. Projektilen träffas från sidan med hjälp av (a) tvåstegsutskjutning, eller (b) genom att projektilen får passera in över målet innan skyddet utlöses.

Tvästegsutskjutning används t ex i det operativa skyddssystemet ARENA där en kassett med kulor skjuts ut mot RSV-stridsdelar, och detonerar i närheten av stridsdelen så att kulorna skjuts ut och skadar RSV-stridsdelen [4]. Vid bekämpning av projektiler, som har högre utskjutningshastighet än RSV-granater, är tillgänglig tid för bekämpning kortare. Hur projektiler påverkas av träff av en stålkula mot mantelytan belyses i [5].

Skyddsvarianter för närbekämpning enligt figur 1(b) har bland annat presenterats av det amerikanska forskningslaboratoriet ARL.

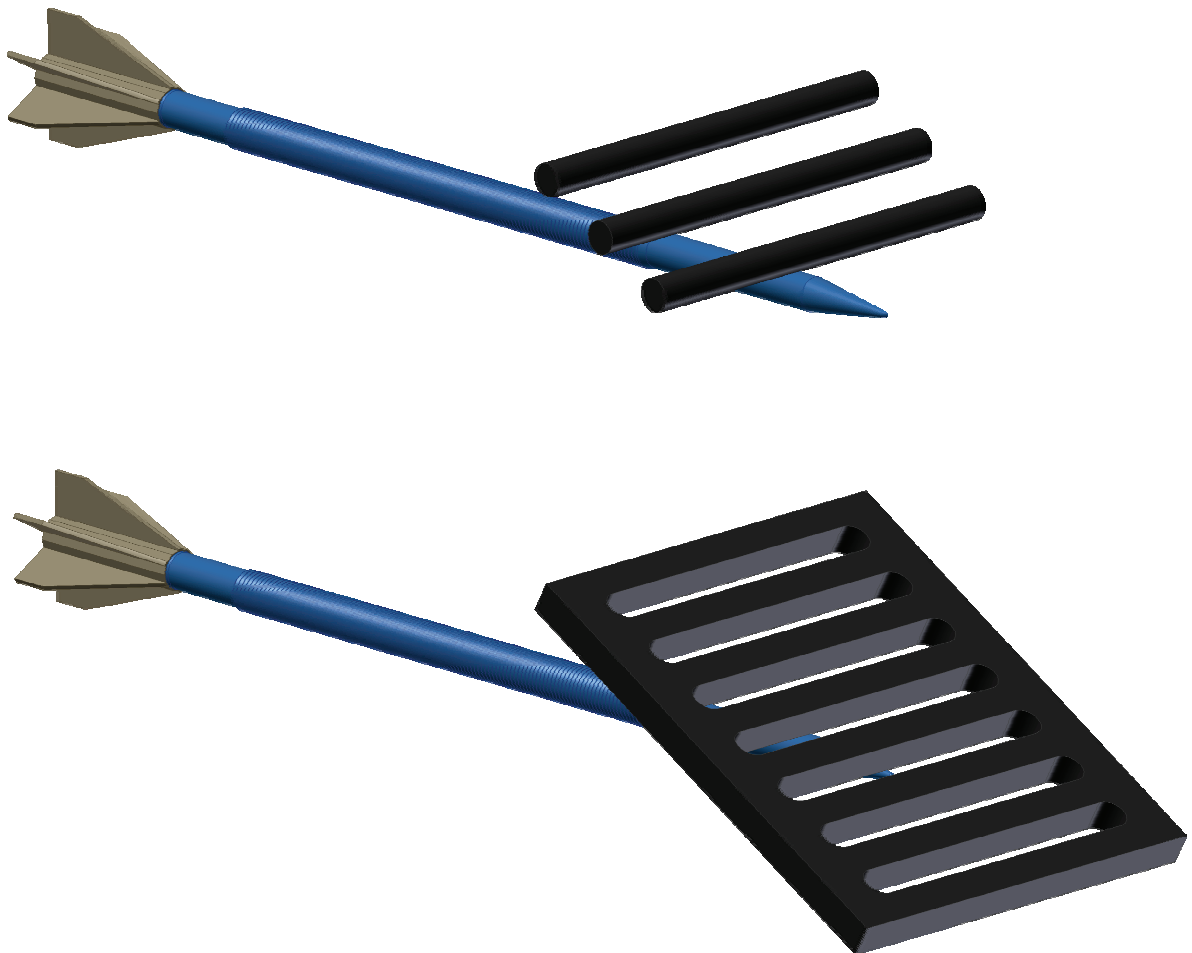


Figur 2. Exempel på skyddsprinciper som bygger på anslag mot projektilens mantelyta, presenterade i ARLs reklambroschyrer.

Några varianter av skyddslösningar enligt figur 1(b) har också studerats vid FOI och redovisats i [6]. Studierna inleddes med försök att med sprängämne leverera stänger som störobject, men övergick sedan pga svårigheter kring utskjutningen till att använda linjära RSV-stridsdelar som störobject.

I den studie som redovisas i denna rapport utreds mer detaljerat vilka effekter som kan erhållas då pilprojektilen träffas av en eller flera stångar mot mantelytan. För att i experimenten erhålla detaljinformation om effekten av interaktionen har omvänd försöksteknik använts där ingående parametrar kan bestämmas med stor noggrannhet.

Skillnaden i effekt beroende på träffpunkt och störobjectets hastighet belyses genom studier av träff med en cylindrisk tvärställd stång. Effekten jämförs med fallet att en plåt träffar projektilen i spetsen. En indikation av hur svåra skador som kan åsamkas projektilen vid mer komplexa belastningsfall ges genom att projektilen utsätts för tre stänger utspridda längs projektilens mantelyta. Sådana effekter skulle kunna erhållas t ex med hjälp av en uppslitsad plåt eller genom utkast av flera objekt.



Figur 3. Varianter på hur den studerade typen av störning kan överföras till projektilen. Ovan löst flygande stänger, nedan uppslitsad plåt.

Att med hjälp av kontinuumdynamiska simuleringar föreskriva uppkomst av brott har tillbaka i tiden varit mycket svårt. Med implementering av nya brottmodeller i simuleringsprogrammet (AUTODYN) har möjligheterna väsentligt förbättrats. Som stöd för studierna och förståelse för iakttagna förlopp har materialparametrar för använda material bestämts och simuleringar av förloppen genomförts. För bestämning av materialparametrar har en förenklad beräkningsmodell som snabbar upp simuleringarna framtagits.

2 Experimentell metod

Den omvända försöksmetodik som använts vid skjutförsöken beskrivs utförligt i [1]. Omvänd skjutteknik innebär att projektilen placeras framför eldrörsmynningen varefter störobjektet skjuts mot projektilen. Genom att variera vinkeln på projektilen och störobjektets hastighet och placering i drivspegeln kan olika kombinationer av projektil- och störobjektshastigheter studeras.

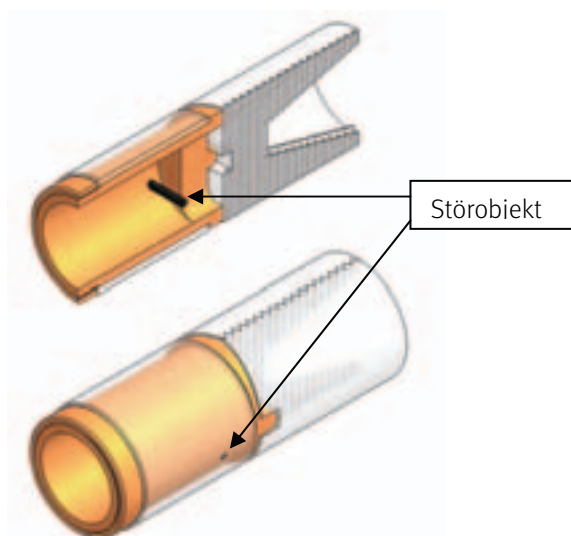
För att kunna jämföra resultaten med tidigare resultat från försök med rörliga vinklade plåtar, valdes som grundfall en tungmetallprojektil med slankhetstalet $L/D = 30$ som träffas av en stålstång i framändan (på avståndet en projektildiameter d in på mantelytan). Projektilen har en hastighet på 2000 m/s och störobjektet/stången, som har samma diameter som projektilen, träffar projektilen med 60° anslagsvinkel, se figur 4.



Figur 4. Studiens grundfall. En cylindrisk tungmetallprojektil träffas i nosen av en stålpinne som slår an tvärs mot projektilen med 60° anslagsvinkel.

Experimenten genomförs i modellskala där projektilens geometri är förenklad (rät cylinder utan gängor, spets eller fenor), diametern 2 mm, framställd av en tungmetall från Kennametal Hertel med beteckningen Y925 (densitet 17700 kg/m^3 , sträckgräns 1300 MPa). Störobjektet är en cylindrisk stålpinne med diametern 2 mm, tillverkad av stål SS 2541-03 (sträckgräns 700 MPa, hårdhet HB 270-325).

Störobjektet (stålpinnen) monteras i en drivspegel för utskjutning mot projektilen, enligt figur 5. Drivspegeln är tillverkad av stål SS 2541-03, med en omslutande lexanhylsa som kontaktyta mot eldrörsväggen och en drivplugg av lexan i bakändan. I drivspegeln borrar hål för fäste av stålpinnen som monteras med spelpassning. Drivspegeln har försetts med en klack i bakändan som försäkrar att den är invriden i rätt position i eldröret och den tvådelade drivpluggen är utformad för snabb separation så att projektilen kan passera fritt.



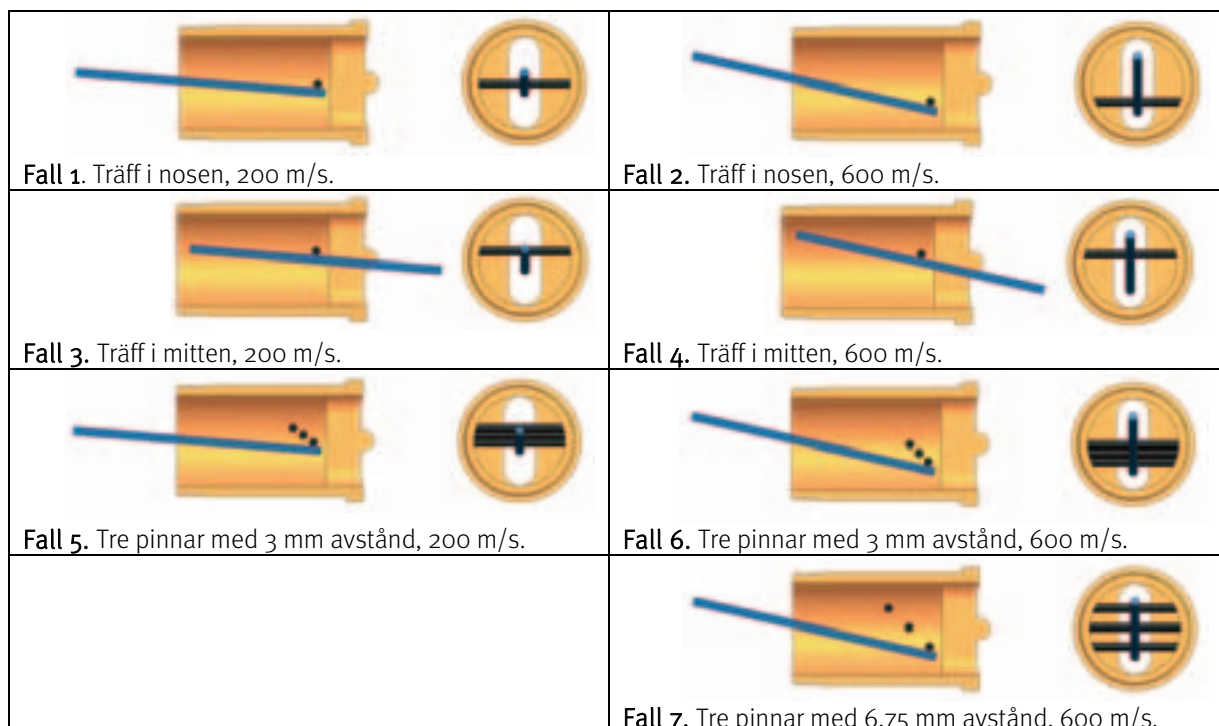
Figur 5. Drivspegel för utskjutning av störpinne/pinnar.

Grundfallet med ett störobjekt som träffar projektilens framände med 60° anslag och 200 m/s har jämförts med fallen då störobjektet i stället träffar mitten av projektilen samt då störobjektet har högre anslagshastighet, 600 m/s.

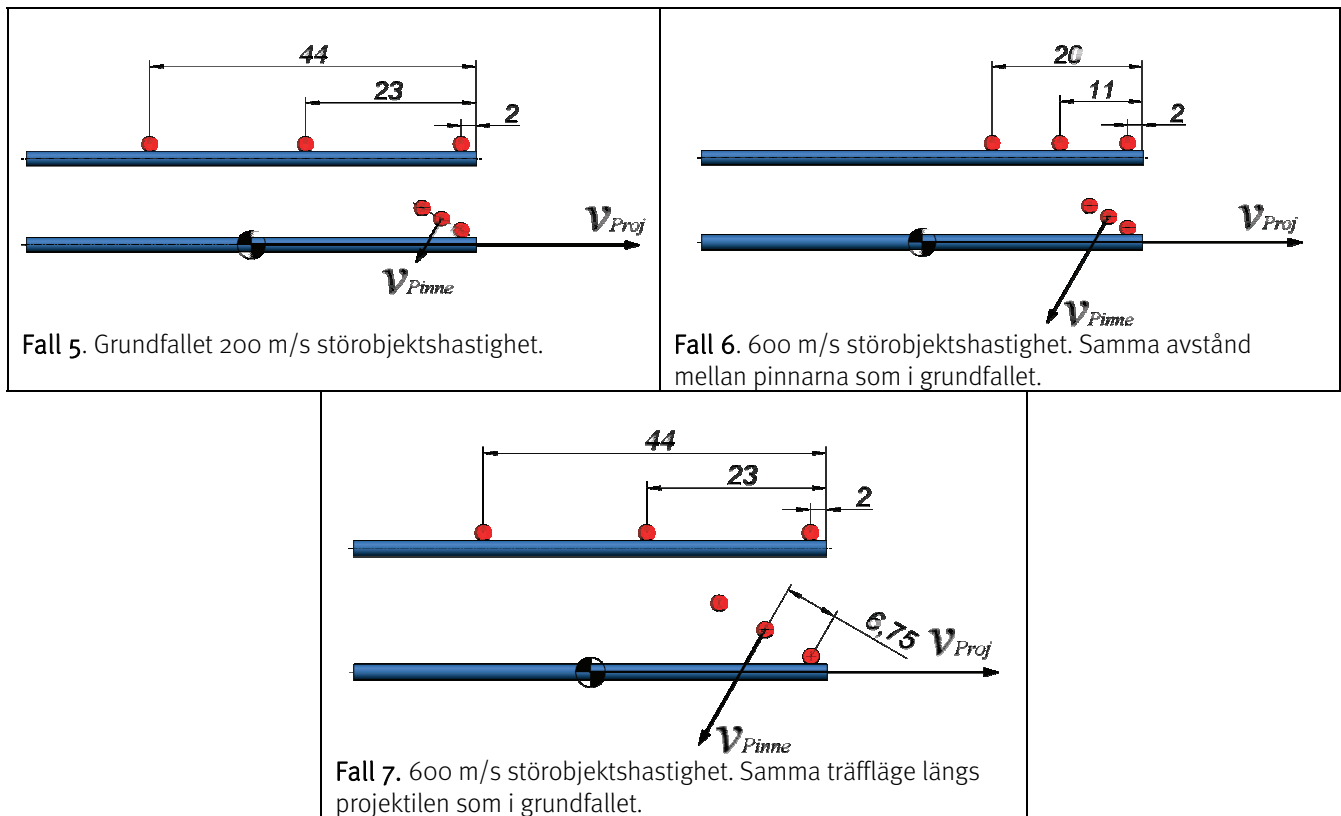
Därefter studeras effekten av träff med flera stänger (3 stycken) med träffpunkter jämnt fördelade utmed projektilens mantelyta. Eftersom projektilen och störobjekten rör sig i förhållande till varandra kommer störobjektens träffpunkt längs projektilen att varieras med hastigheten. Om avståndet mellan störpinnarna i drivspegeln är desamma vid de olika störobjektshastigheterna (200 resp 600 m/s) erhålls tätare anslag mot projektilen vid den högre hastigheten. Två varianter har därför använts för 600 m/s-fallet och flera störobjekt: ett med samma störobjektsavstånd som i 200 m/s-fallet, ett där pinnarna placeras i drivspegeln så att samma träffpunkter som i 200 m/s-fallet erhålls. De fall som ingått i studien framgår av tabell I och figur 6. Figur 7 visar beräknade träffpunkter i de tre sista fallen.

Tabell I. I studien ingående fall

Fall	Träffpunkt	Hastighet [m/s]	Antal pinnar	Avstånd mellan pinnarna i drivspegeln [mm]	Avstånd mellan pinnarnas islag på projektilen [mm]
1	Nos	200	1	-	-
2	Nos	600	1	-	-
3	Mitten	200	1	-	-
4	Mitten	600	1	-	-
5	Utbrett längs hela projektilen	200	3	3	21
6	Utbrett längs del av projektilen	600	3	3	9
7	Utbrett längs hela projektilen	600	3	6,75	21



Figur 6. I studien ingående fall



Figur 7. Beräknade träffpunkter i fallen med flera pinnar.

Röntgenblixtar används för registrering av projektilens geometri och läge efter interaktionen samt för registrering av erhållen drivspegelhastighet. Registreringen av projektillen har genomgående genomförts 100 och 200 μs efter träff. En tredje registrering av projektillen har genomförts vid varierande tidpunkt i de olika skotten. I de första skotten gjordes en registrering efter 5 μs i hopp om att se något av själva interaktionen mellan projektil och störobjektet (pinnen). Då detta inte gav önskat resultat användes istället den tredje blixten för en registrering 150 μs efter träff. Vid varje försök görs också en referensregistrering av projektillen före skott.

Bilderna från röntgenblixtnregistreringarna av projektillen efter interaktionen med störobjektet (tagna i två ortogonala projektioner vid fyra tidpunkter) har bearbetats dels så att projektfelena pga avstånden mellan röntgenblixtrören eliminerats, och dels vridits upp så att referensprojektillen ligger i horisontalplanet. De bearbetade bilderna visar således den deformation och förflyttning som orsakats av interaktionen.

Ytan på de projektildelar som återfunnits efter skott har inspekterats för att utröna hur länge störobjektet hållit ihop och överfört kraft till projektillen.

3 Simuleringsmetod

Referens [1] beskriver det inledande arbetet kring simulering av brott i slanka projektiler utsatta för snedkrafter. Den studien behandlade interaktionen mellan slanka projektiler och rörliga plåtar. Använda material och geometrier överensstämmer med de som används i denna rapport. Syftet med simuleringarna var i det första steget, som redovisas i [1], att utreda hur kraften som överförs till projektilen ändras med plåtens rörelseriktning och storlek. I experimenten är det möjligt att utvärdera rörelsemängd och förflyttning av projektilen i tvärs dess hastighetsvektor efter interaktion med plåten. I simuleringarna anpassades brottöjningen för plåten så att delen av projektilens rörelsemängd tvärs dess hastighetsvektor stämde med experimenten. En brottöjning på 60 % befanns vara lämplig i detta fall.

Därefter utfördes simuleringar i syfte att hitta lämplig brottmodell och materialparametrar som beskriver projektilens brottbeteende vid denna typ av last. En förenklad modell som snabbar upp simuleringarna framtoogs varvid ett stort antal parameteruppsättningar kunde testas. Arbetet ledde till god överensstämmelse mellan simulering och experiment i frågan om när brott uppstår samt i de fall då brott inte uppstår. Materialet i projektilen, Y925, modellerades med Johnson-Cooks hållfasthets- och brottmodell se Appendix I. Även den rörliga stålplåten och stången/stängerna modellerades med Johnson-Cooks hållfasthetsmodell. För den rörliga plåten användes en brottöjning på 60%, som tidigare påpekats. För stången/stängerna användes ingen brottmodell (endast numerisk erosion) eftersom brottöjningen hade liten påverkan på resultatet.

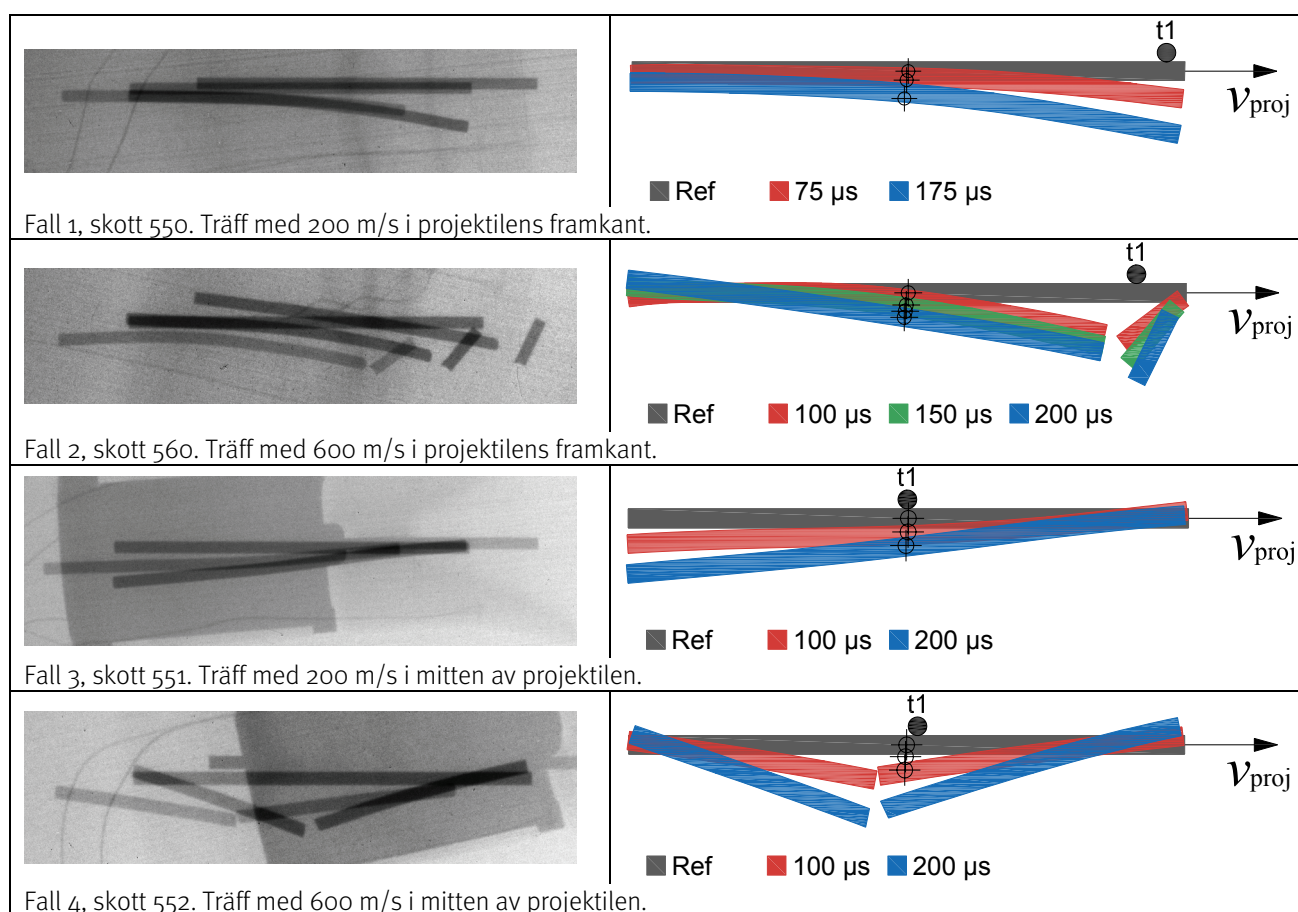
De modeller och materialparametrar som användes vid simuleringar av rörliga plåtars interaktion med pilprojektiler har använts vid simuleringarna av träff med en resp tre stänger mot projektilens mantelyta.

4 Resultat

4.1 Ett störobjekt

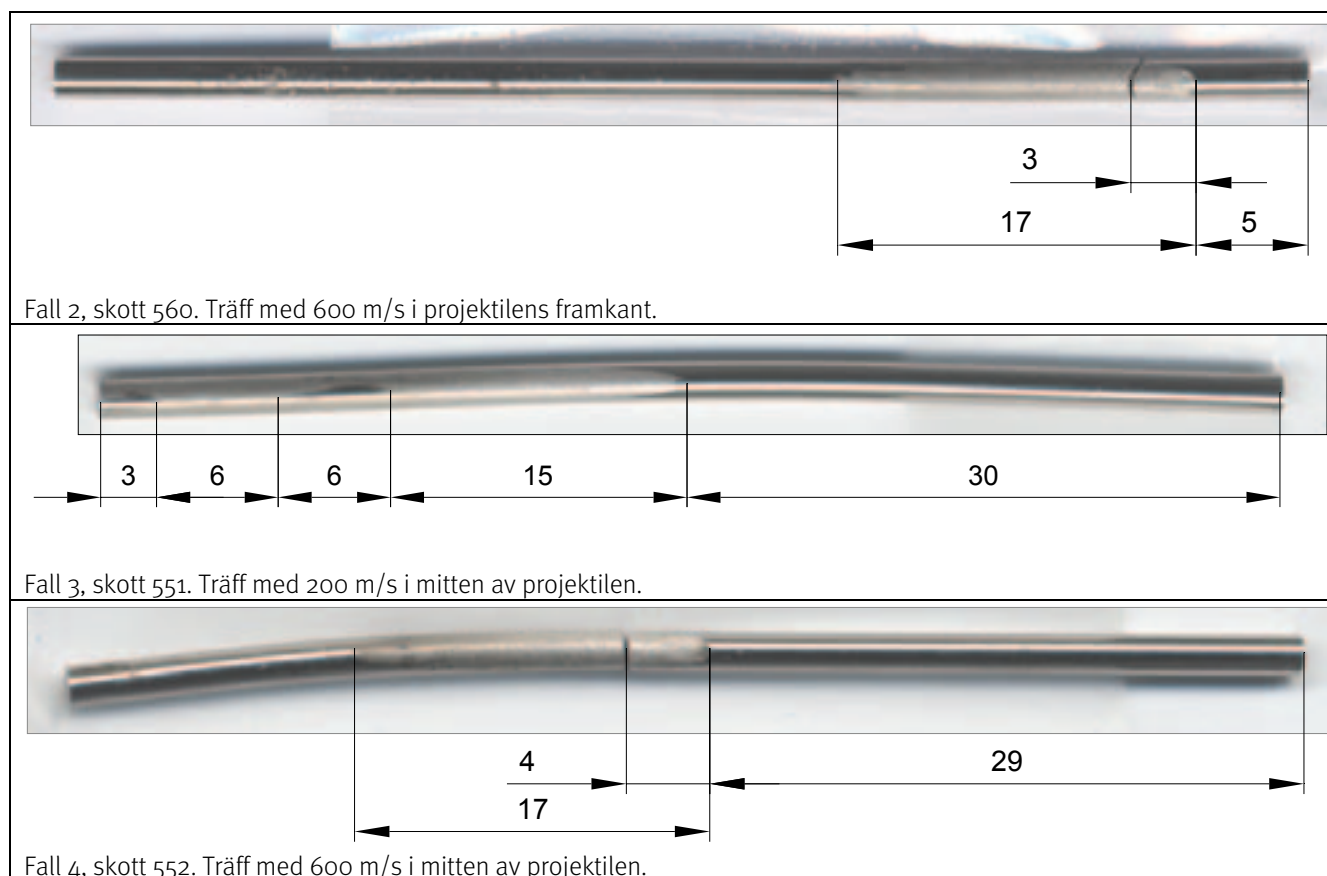
I figur 8 visas resultaten från försöken med ett störobjekt. Till vänster visas röntgenblixtbilder över projektilen vid fyra tidpunkter, en referensbild tagen före träff och två eller tre bilder efter interaktionen. Till höger i samma bild visas de utvärderade bilderna där kompensation för projektfelen pga avstånden mellan röntgenblixtrören gjorts.

Vid skott 551 och 552 (och 550) gjordes den första registreringen redan 5 μs efter träff i avsikt att se hur störobjektet påverkades av interaktionen. Drivspegeln finns därför med på röntgenblixtbilderna i dessa skott. Då ingen information om störobjektet kunde utläsas ur dessa bilder övergavs de tidiga registreringarna i efterföljande skott. I skott 550 har alla registreringarna utlöst ca 25 μs för tidigt varför bilden inte visar drivspegeln men två referensbilder före interaktionen. (De två referensregistreringarna ger en indikation om storleken av projektfelen pga röntgenblixstavståndet.) Resultatet bedöms relevant trots något för tidiga registreringar.



Figur 8. Resultat från skott med *ett* störobjekt. Till vänster: ursprungsregistrering med röntgenblixtteknik, till höger: utvärderad bild av projektilens rörelse pga påverkan från störobjektet.

Figur 9 visar de, efter skott, återfunna projektilerna där kontaktytorna som uppkommit vid interaktionen mellan störobjektet/pinnen och projektilen kan identifieras. (Projektilen från skott 550, fall 1, har tyvärr ej kunnat återfinnas.) Krökningen av projektilen i detta plan härstammar från islaget i skjuttanken efter interaktionen mellan projektil och störobjekt.



Figur 9. Kontaktmärken efter anslag av störojektet. Måtten anger kontaktområdets läge och längd samt i förekommande fall brottets läge i förhållande till anslagspunkt.

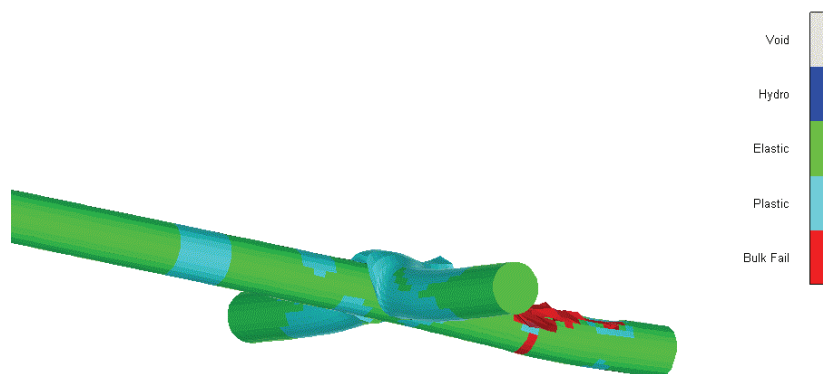
För fallen träff i projektilens framkant finns endast projektilen som träffats med hög hastighet, fall 2, utvärderad. Träffpunkten ligger något längre in på projektilen än vad som avsågs och kontaktytans längd är densamma som i fall 4 där störojektet träffar med samma hastighet. I fallen träff mitt på projektilen, fall 3 och 4, har störojektet slagit i på avsedd plats längs projektilens mantelyta och legat kvar i kontakt med projektilen en relativt lång sträcka. I fallet med 200 m/s anslagshastighet, fall 3, är det dock svårt att säkert identifiera interaktionsytan. På ovansidan av projektilen ser det ut som att störpinnen lättat från projektilen för att sedan återfå kontakt. I sidovyn tycks det dock varit kontakt hela vägen. De utvärderade sträckornas längd framgår av tabell II.

I de fall projektilen gått av har brottet skett bakom anslaget på ett avstånd som framgår av figur 9 och tabell II.

Tabell II. Störelementets kontaktläge längs projektilen och läget för brott av projektilen.

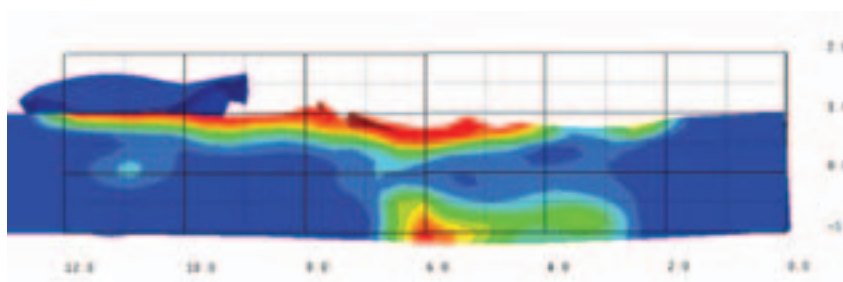
Fall	Islagets avstånd från framändan [mm]		Kontaktens längd [mm]	Brottets avstånd från framändan [mm]	Brottets avstånd från träffpunkten [mm]
	Avsedd	Erhållen			
1	2	-	-	Inget brott	Inget brott
2	2	5	17	8	3
3	30	30	15 (30)	Inget brott	Inget brott
4	30	29	17	33	4

Figur 10 visar en bild från simuleringen av en pinne (stål SS2541-03) som med hastigheten 600 m/s och anslagsvinkeln 60° träffar projektilen i nosen (fall 2). Bilden visar materialstatus i kropparna 4,5 μ s efter träff och tyder på att projektilen kommer att gå till brott i framändan samt att pinnen glider längs med projektilen och deformeras kraftigt.



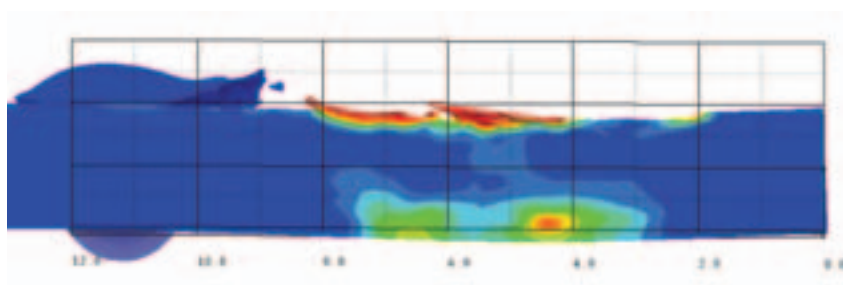
Figur 10. Pinne som träffar nära projektilens nos (fall 2).

I figur 11 visas att ett brott uppstår ca 4 mm från pinnens träffpunkt på projektilen vilket är längre in än vid experimentet där brottet uppstod 2,6 mm från pinnens träffpunkt på projektilen. I simuleringen var cellstorleken ungefär lika som i tidigare simuleringar med rörliga plåtar dvs, 12 celler längs projektilens diameter. Det kan även noteras att som förut påpekats så sker en något överdriven skadeutveckling i kontaktytan mellan pinne och projektil.



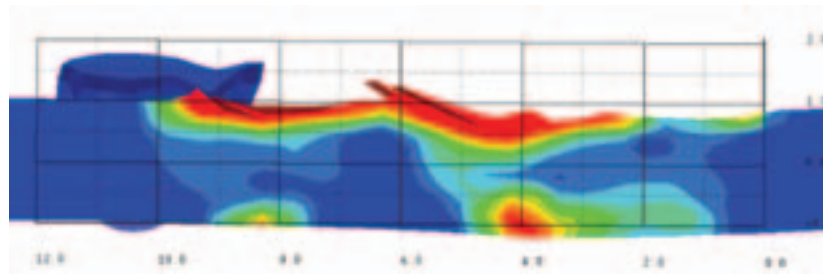
Figur 11. Skadeutbredning i projektilens framände till följd av en pinne som träffar nära projektilens nos med 600 m/s (fall 2).

I figur 12 visas en likadan simulering som i figur 11 men med hälften så stora celler, 24 celler längs projektilens diameter. Det framgår att skadebilden blir något annorlunda samt brottpunkten flyttas framåt till 2,6 mm från pinnens träffpunkt på projektilen vilket stämmer med experimentet i fall 2, figur 9. Man kan notera att i experimenten är brottytan sned och brottet startar på projektilens undersida, 2,6 mm från pinnens islagpunkt. På projektilens ovensida är läget för brottet 3 mm från islagpunkten. Det kan även noteras att skadeutveckling längs kontaktytan minskar när en finare modell används.



Figur 12. Samma fall som i figur 11 men simuleringen har genomförts med hälften så stora celler i projektilen.

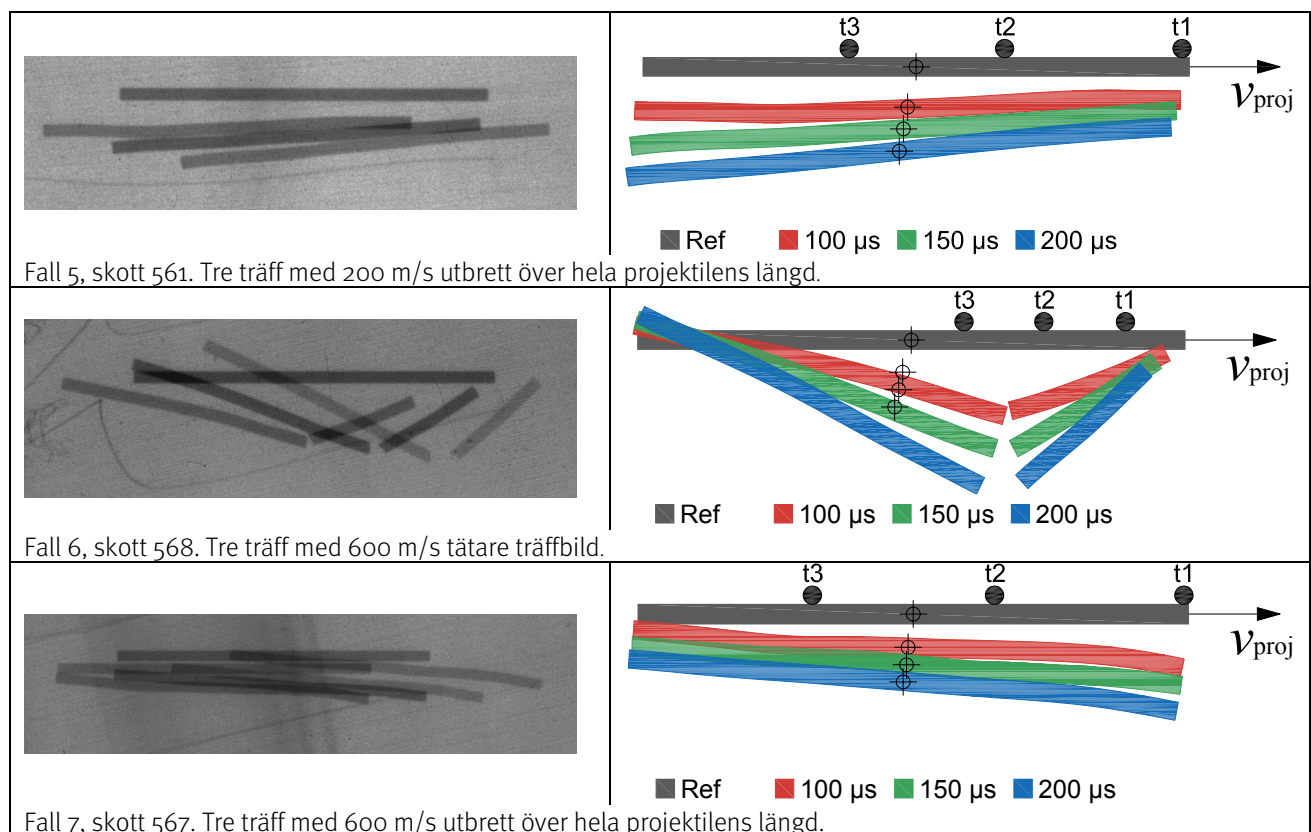
I figur 13 visas en simulering när pinnen träffar på mitten av projektilen. I denna simulering har den ursprungliga cellstorleken använts, dvs 12 celler längs diametern som i figur 11. Det framgår att brott uppstår 4 mm räknat från projektilens mitt, vilket stämmer med experimentet. Om simuleringen görs med anslagshastigheten 200 m/s uppstår inget brott i projektilen vilket även det stämmer med experimenten.



Figur 13. Skadeutbredning i projektilen till följd av en pinne som träffar mitt på projektilen med 600 m/s (fall 4).

4.2 Tre störobjekt

Figur 14 visas resultaten från försöken med fler störobjekt. Som tidigare visas till vänster röntgenblixtbilder över projektilen vid fyra tidpunkter, till höger de utvärderade bilderna där kompensation för projektfelen pga avstånden mellan röntgenblixtrören gjorts.

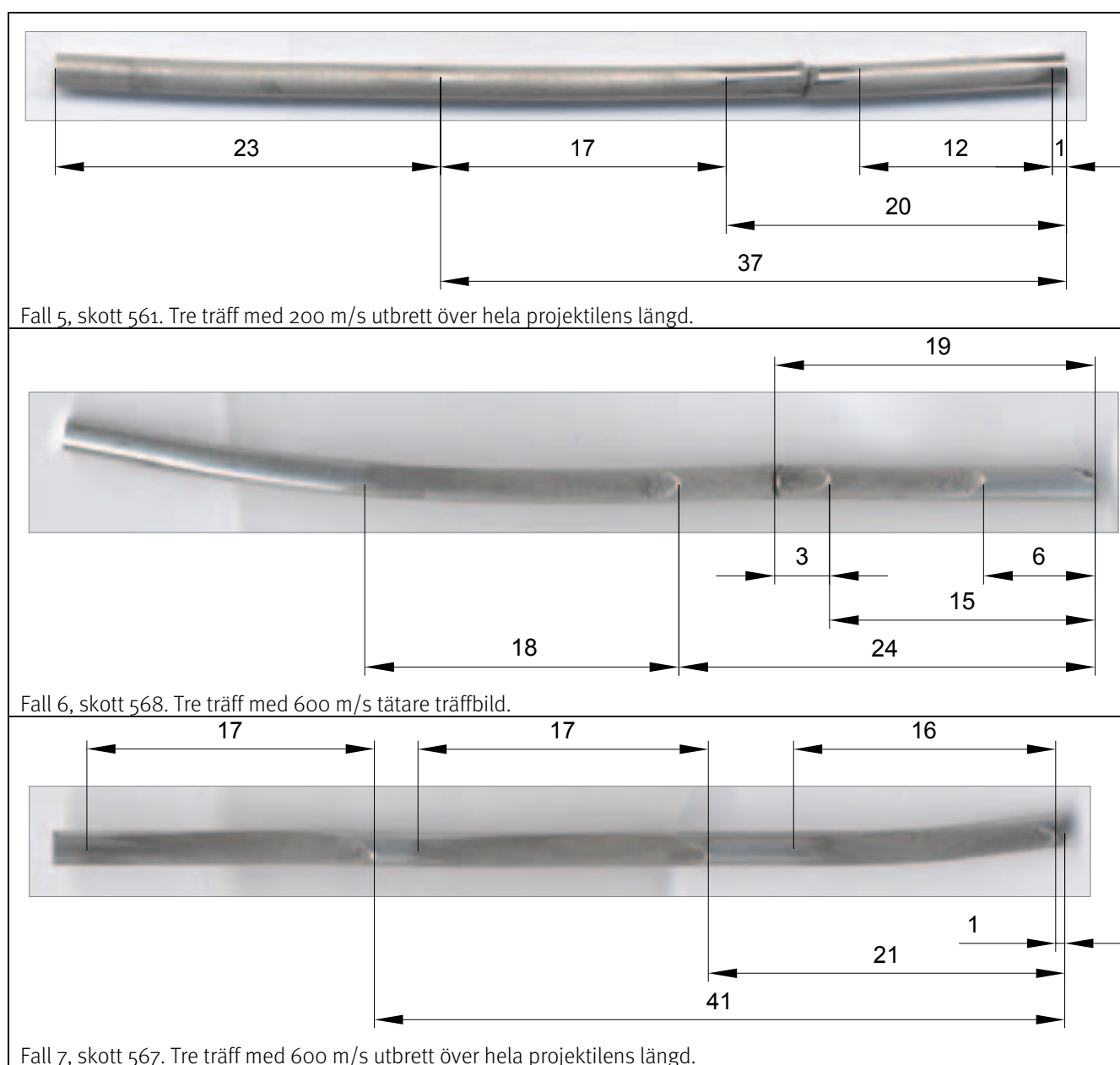


Figur 14. Resultat från skott med *tre* störobjekt. Till vänster: ursprungsregistrering med röntgenblyxtteknik, till höger: utvärderad bild av projektilens rörelse pga påverkan från störobjektet.

Figur 15 visar restprojektilerna med kontaktytor efter störpinnarna såsom de återfanns efter skott och tabell III sammanfattar de utvärderade lägena för anslag, kontaktytans längd samt läge för eventuellt brott. Krökningen av projektilerna har uppkommit i samband med islag i tanken efter interaktionen, liksom brottet i fall 5 som inte orsakats av interaktionen med störobjektet enligt röntgenblyxtbilderna. I fall 6 går det inte att utvärdera kontaktytornas längd då de går i varandra.

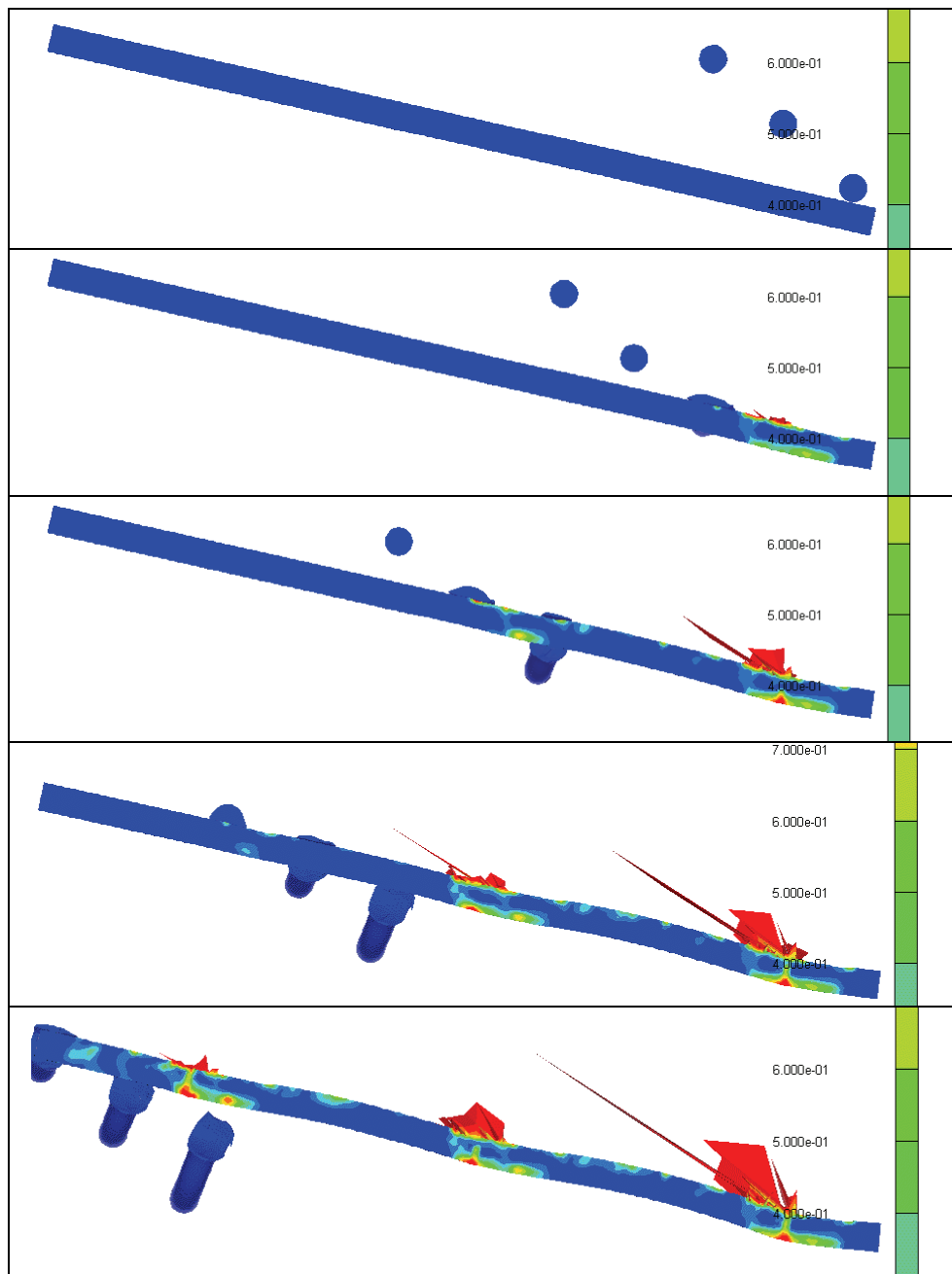
Tabell III. Störellementens kontaktläge längs projektilen och läget för brott av projektilen.

Fall	Islagets avstånd från framändan [mm]		Kontaktens längd [mm]	Brottets avstånd från framändan [mm]	Brottets avstånd från träffpunkten [mm]
	Avsedd	Erhållen			
5	2	1	11	-	-
	23	20	17	-	-
	44	37	23	-	-
6	2	6	-	-	-
	11	15	-	19	3
	20	24	18	-	-
7	2	1	14	-	-
	23	21	17	-	-
	44	41	17	-	-



Figur 15. Kontaktmärken efter anslag av störobjekten. Måtten anger kontaktområdets läge och längd samt i förekommande fall brottets läge i förhållande till anslagspunkt och projektilände.

Det faktum att projektilen inte går av vid den högre hastigheten såsom vid träff med ett störobjekt ledde till frågan huruvida de olika störobjekten arbetar oberoende av varandra eller inte. Simuleringar av fall 7 med tre störobjekt som träffar med 600 m/s utbrett över projektilens längd tyder på att störpinnarna i detta fall inte påverkar varandra. Varje pinne tycks hinna verka klart på projektilen innan nästa störobjekt träffar, se figur 16. Simuleringarna tyder också på att det borde uppstå brott i projektilen till följd av varje anslag.

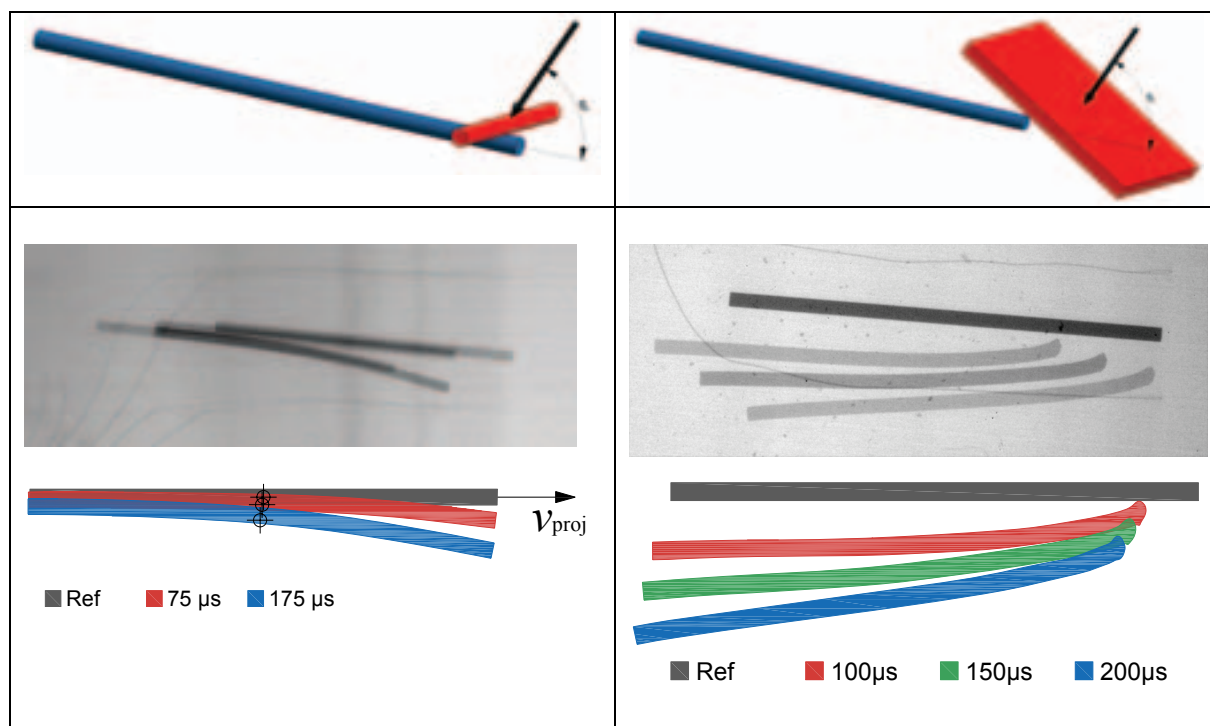


Figur 16. Simuleringsresultat för träff med tre störobjekt (fall 7).

5 Diskussion

Försöksmetoden har varit lyckosam då störojektet träffat projektilen på avsett område och hållit ihop så att den kunnat överföra kraft till projektilen såsom avsetts. Möjligen kan oavsiktliga mindre variationer beträffande hur hårt störojektet fästs i drivspegeln ha påverkat resultaten.

Effekten av ett anslag mot mantelytan i projektilens framkant jämförs i figur 17 med effekten av ett anslag mot projektilspetsen. Störningen överförs i det första fallet av en stång med samma diameter som projektilen, i det andra fallet av en plåt med samma tjocklek som projektilens diameter. Materialet, hastigheten och anslagsvinkeln är desamma i de båda fallen ($v_{Pinne/Plåt} = 200\text{ m/s}$, $v_{proj} = 2000\text{ m/s}$). Plåtens massa blir dock med dessa förutsättningar betydligt större än stångens.



Figur 17. Jämförelse mellan effekten av en stång som träffar mantelytan och en plåt som träffar projektilspetsen givet samma material, hastigheter och anslagsvinkel. Resultatet till höger är hämtat ur [1].

Effekten i grundpansaret av dessa båda belastningsfall bedöms vara av samma storleksordning trots att massan i stången är betydligt mindre än massan i plåten och att plåten överför kraft till projektilen under en längre sträcka. Plåtens geometriska utsträckning gör att den räcker över hela projektilens längd medan stången konsumerats efter en begränsad sträcka. Utträdet ur plåten böjer projektilnosen mot plåtens normal (omvänt i förhållande till den ursprungliga belastningsriktningen).

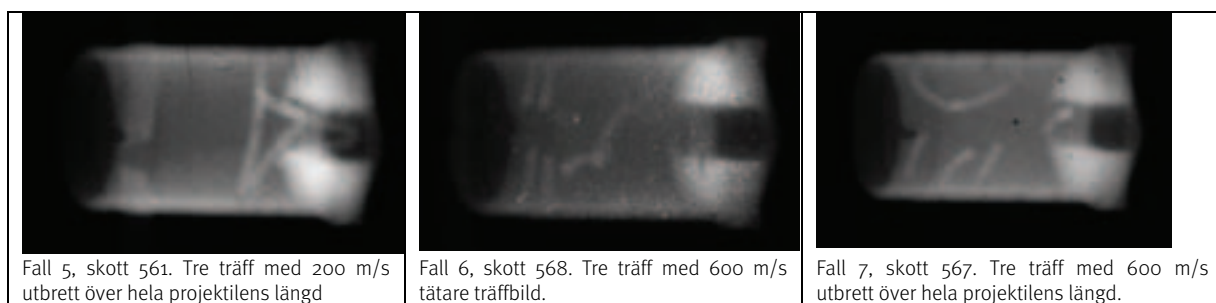
Det faktum att störojektet ligger an mot projektilen som en utbredd last en bit efter anslaget gör att även träff mitt på projektilen ger upphov till en rotation av projektilen. Eftersom belastningen ligger bakom tyngdpunkten sker rotationen i motsatt riktning.

För att få brott på projektilen krävs en högre störojektshastighet än 200 m/s. Såväl vid träff i framkanten som i mitten av projektilens längd erhöles, vid ett störojekt med 600 m/s hastighet, brott en bit bakom träffpunkten medan 200 m/s inte gav några brott. Även simuleringarna förutsade detta brottbeteende, såväl huruvida brott uppstår eller inte som placeringen av brottytan stämmer mot experimenten.

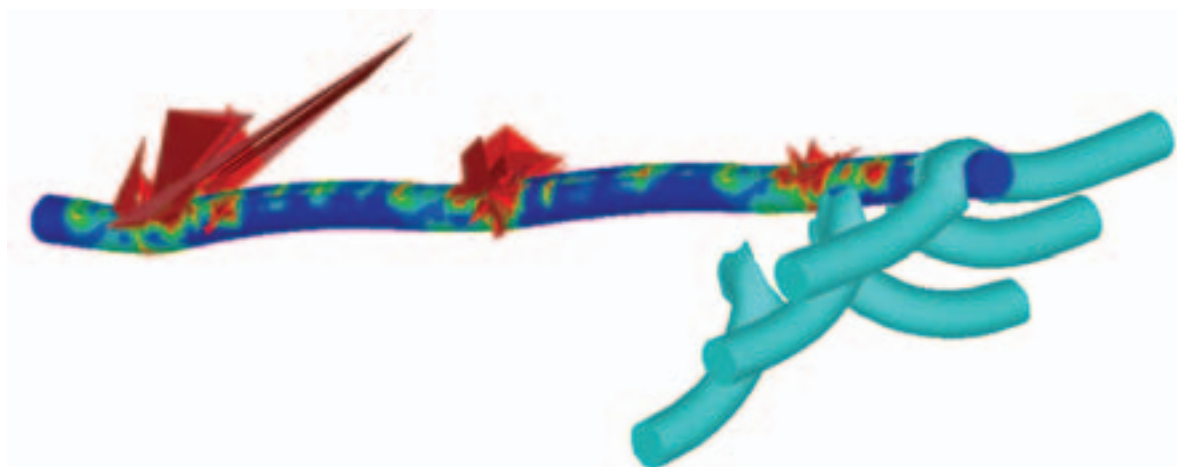
I försöken med tre störojekt erhöles dock endast brott vid ett av sex möjliga islag med den högre hastigheten. Eftersom åtminstone den första störpinnen träffar projektilen med samma förutsättningar

som i fallet med ett störobjekt, utan vetskap om att det kommer fler störobjekt, borde denna ge upphov till brott på samma sätt som i fallet en störpinne. I fallet med utbredd träffpunkt bör, enligt kontaktmärken och simulering, varje störpinne ha fritt utrymme och tid att verka separat från varandra, varför det även för dessa kan antas att brott skulle uppstå. Varför detta inte inträffar är för närvarande oklart.

En möjlig förklaring till avvikelsen mellan resultaten med ett och flera störobjekt är personalbyte i verkstan mellan de två experimentella serierna. Det skulle kunna innebära att störpinnarna monterats olika hårt i drivspegeln varvid de utövat olika stort motstånd mot projektilen. Tyvärr är det mycket svårt att utskilja störpinnarna i röntgenblixtbilderna från försöken. Figur 18 visar de bilder som finns att tillgå där störobjekten kan skönjas. Samtliga dessa är från försök med flera störobjekt och visar drivspegeln ca 450 μ s efter träff. I motsvarande bilder från försöken med ett störobjekt kan pinnarna inte utskiljas, troligen beroende på att vätskan i framkallningsmaskinen var bättre (nybytt) vid den senare försöksserien. De bilder som finns tyder dock på att störobjekten ibland släpper från drivspegeln, ibland inte. Huruvida detta har betydelse för interaktionsförloppet eller inte är dock oklart. Figur 19 visar störobjektens geometri efter interaktionen enligt simuleringarna.



Figur 18. Röntgenblixregistreringar av drivspegeln efter interaktionen mellan projektil och störobjekt. Resterna av de tre störobjekten syns inne i drivspegelkroppen.



Figur 19. Störobjektens utseende efter interaktion mellan projektil och tre störobjekt med hastigheten 600 m/s (fall 7) enligt simulering.

6 Slutsats

Mot projektilen utkastade störobjekt i form av enstaka cylindriska pinnar kan, om de har tillräckligt stor hastighet, slå sönder projektilen och därmed utgöra en första del i skyddet mot snabba pilprojektiler. Det är dock oklart om skydd som bygger på fler träffar mot projektilen, t ex flera pinnar eller rörliga galler, ger samma effekt.

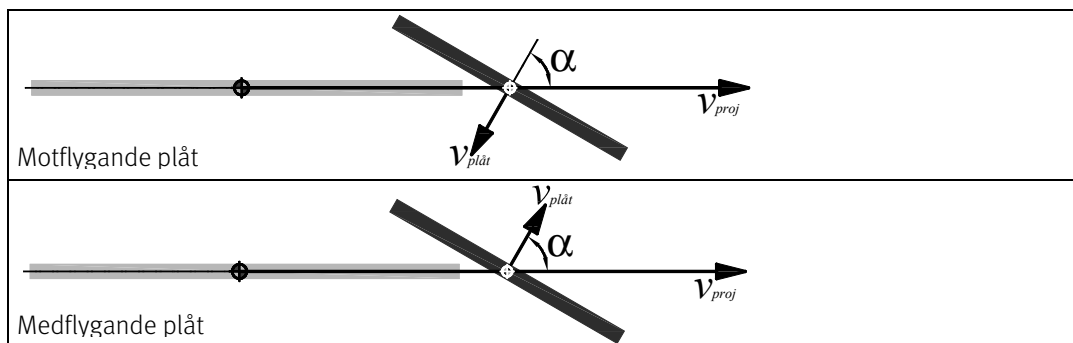
Med hjälp av nya modeller och framtagna materialparametrar finns nu viss möjlighet att studera brott i slanka projektiler med hjälp av kontinuummekaniska simuleringar.

7 Referenslista

1. Lidén Ewa, Andersson Olof och Tjernberg Anders: Inverkan av grundläggande plåt- och projektilparametrar på rörliga plåtars skyddsförmåga. FOI-R--1607--SE, 2005.
2. Lidén Ewa, Johansson Bo and Lundberg Bengt: Effect of thin oblique moving plates on long rod projectiles: A reverse impact study. International Journal of Impact Engineering. Article in press, Available online May 2005.
3. Lidén Ewa, Andersson Olof and Lundberg Bengt: Influence of different plate and projectile parameters on the interaction between long rod projectiles and thin oblique plates. International Journal of Impact Engineering. Kommande artikel.
4. Lindström Rickard O.: Det ryska sensoraktiverade skyddssystemet ARENA – en överblick. FMV-rapport FORDON H 21 610:320/95, 1995.
5. Mousavi Saed and Lidén Ewa: Interaction of long rod projectiles with side impacting fragments. 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, TX, 15-19 Nov 1999.
6. Ottosson John, Kjellgren Jan, Andersson Gunnar, Andersson Olof, Lundgren Jonas och Örnhed Håkan: Slutrapport, Sensoraktiverade Skydd 2001-2003. FOI rapport FOI-RH—0269—SE.
7. Skoglund Peter: Constitutive modelling and mechanical properties of a tungsten heavy metal alloy. FOI rapport FOI-R—0723—SE, 2002.
8. Lidén Ewa, Ottosson John and Holmberg Lars: WHA long rods penetrating stationary and moving oblique steel plates. Proc 16th Int. Symp. On Ballistics, San Francisco, CA, USA, Vol 3, pp 703-712, 1996.
9. Børvik T. , Hopperstad O. S., Berstad T., On the influence of stress triaxiality and strain rate on the behaviour of a structural steel, Part II, Numerical study, European J. of Mechanics, A/solids, 22, pp. 15-32, 2003.
10. Mirza M. S., Barton D. C., Church P., The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile metals, J. of Material Science, 31, pp. 453-461, 1996.
11. Johnson G. R., Cook W. H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mech., 21, pp. 31-48, 1985.
12. Dey S., Hopperstad O. S., Børvik T., Clausen A. H., Constitutive relation and failure criterion for three structural steels at high strain rates, Structures Under Shock and Impact VII, 2002
13. Tjernberg A., Estimation of parameters for the Johnson-Cook failure and strength model, FOI-R-1213--SE, Swedish Defence Research Agency, 2004.

1 Appendix I. Verifiering av använd simuleringsmodell

Vid studier av interaktionen mellan slanka projektiler och rörliga plåtar har ett omfattande arbete kring simulering av brott i slanka projektiler utsatta för snedkrafter genomförts. I dessa studier används, liksom i denna studie, projektiler med slankhetstalet $L/D = 30$, tillverkade av tungmetall Y925 och ett störobject (plåten) med tjocklek lika med projektildiametern, tillverkad av stål SS2541-03. Projektildiametern och plåttjockleken var 3 mm och plåtvinkeln 60° .



Figur 20. Definition av plåtvinkel och plåthastighet

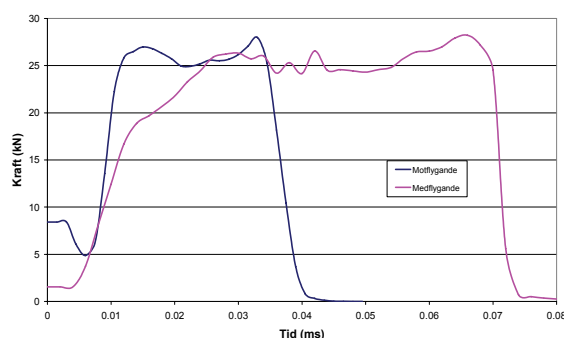
1.1 Projektilens sidoförflyttning till följd av interaktion med rörlig plåt

Simuleringarna genomfördes till att börja med i syfte att utreda hur kraften som överförs till projektilen ändras med plåtens rörelseriktning. Johnson-Cooks modell

$$Y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - (T^*)^m \right) \quad (1)$$

där Y är flytspänningen, ε töjningen, $\dot{\varepsilon}$ töjningshastigheten, T^* den så kallade homologa temperaturen och A , B , C , n och m är hållfasthetsparametrar. Hållfasthetsparametrar för tungmetallen Y925 och stålet SS2541-03 hämtades från [7] resp [8]. I detta fall användes ingen brottmodell (endast numerisk erosion) för projektilen.

Det konstaterades i [1] att om en konstant brotttöjning på 60% användes för plåten i simuleringarna erhöles en sidoförflyttning av projektilen som stämde med experimenten. Även storleken på den del av rörelsemängden tvärs projektilens hastighetsvektor stämmer med experimenten. Detta indikerade att den kraft som verkade vinkelrätt mot projektilen var rimlig. Det visades vidare att komponenten av kraften tvärs projektilen är relativt konstant längs hela projektilens längd, att storleken på kraften inte påverkas av om plåten är motflygande eller medflygande [1] samt att storleken på kraften endast har ett svagt beroende på absolutbeloppet av plåthastigheten. Detta innebär att komponenten av kraften tvärs projektilen mest styrs av plåtens hållfasthet (och plåttjocklek), mindre av tröghetskrafterna.



Figur 21. Komponenten av kraften tvärs projektilen (transversalkraften) som funktion av tiden vid interaktion mellan tungmetallprojektil och rörlig stålplåt [1]. Plåten rör sig i båda fallen med hastigheten 300 m/s. Blå kurva gäller då plåten rör sig mot projektilen (motflygande plåt), rosa kurva gäller då plåten rör sig i samma riktning som projektilen (medflygande plåt).

1.2 Projektilens brottbeteende

Brott längre bak på projektilen förekommer endast i fallen med medflygande plåt. I fallen med motflygande plåt lossnar endast mindre bitar i nosen [1]. Då komponenten av kraften tvärs projektilen enligt ovan är oberoende av plåtens rörelseriktning måste andra parametrar vara avgörande för om projektilen går till brott eller ej. En tänkbar storhet är svephastigheten, dvs den hastighet som kraften på projektilen förflyttar sig med längs mantelytan. Medflygande plåtar har en längre interaktionstid än motflygande plåtar vilket indikerade att svephastigheten ska vara låg för att orsaka så mycket fragmentering av projektilen som möjligt.

Svephastigheten ges av

$$v_{\text{svephastighet}} = \frac{v_{\text{plåt}}}{\cos(\alpha)} + v_{\text{proj}} \quad (2)$$

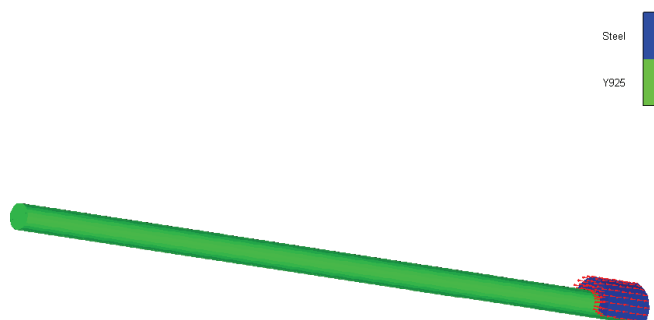
där $v_{\text{plåt}}$ och v_{proj} är plåtens resp projektilens hastighet och α är plåtens snedställningsvinkel.

I Tabell IV visas svephastigheten beräknad med ekvation (2) samt den komponenten av kraften tvärs projektilen som erhöles i simuleringarna då en medflygande plåt träffar projektilen. Projektilhastigheten v_{proj} var 2000 m/s och plåthastigheten varierades från -100 till -300 m/s (medflygande).

Tabell IV: komponenten av kraften tvärs projektilen (Transversalkraft) och svephastighet för olika plåthastigheter (medflygande plåtar).

Plåthastighet [m/s]	Svephastighet [m/s]	Transversalkraft [kN]
-300	1400	25
-200	1600	22
-100	1800	18

I syfte att studera inverkan av olika svephastigheter har en förenklad modell som snabbar upp simuleringarna framtagits. I denna modell överförs en konstant transversalkraft längs projektilen via en halv hylsa med längden 6 mm. Materialet i hylsan är linjärt elastiskt med lika skjuvmodul som stål. Transversalkraften påföres genom att applicera ett konstant yttryck på hylsans ytteryta. Densiteten för hylsan är 2000 kg/m^3 (vilket är lägre än för stål), vilket gör att massan för hylsan blir försumbar jämfört med projektilen. Detta leder i sin tur till att kontaktkraften mellan hylsa och projektil blir i stort sett lika som den kraft som appliceras på hylsans ytteryta. Genom att variera den hastighet med vilken hylsan glider längs projektilen är det möjligt att undersöka inverkan av olika svephastigheter. Svephastighet appliceras som en begynnelsehastighet på hylsan. När hylsan glider längs projektilen snedställs hylsan något beroende på deformationen av projektilen. Snedställningen medför att hylsan förlorar en del av sin begynnelsehastighet när den glider längs projektilen. Denna hastighetsminskning är i de flesta fall försumbar. Om hylsan har en alltför låg massa kan dock en relativt stor del av begynnelsehastigheten förloras.



Figur 22. Förenklad modell med transversalkraft som sveper längs projektilen.

Eftersom simuleringen går så snabbt blir det möjligt att göra simuleringar för många olika uppsättningar av brottparametrarna. Dessutom behöver inte den mer komplicerade växelverkan mellan projektil och plåt (med borteroderade celler mm) beaktas. Denna växelverkan orsakar ofta en överdriven fragmentering i kontaktytan om en brottmodell används för projektilen. Detta orsakas troligen av att kontaktalgoritmen skapar numeriska oscillationer som i sin tur genererar den överdrivna fragmenteringen. Sådana problem uppkommer inte vid användning av en halv hylsa för överföring av transversalkraften som i figur 22.

Som brottmodell för projektilmaterialet Y925 används Johnson-Cooks (J-C) brottmodell. I denna modell är den plastiska effektivtöjningen vid brott

$$\varepsilon_f(\sigma^*, \varepsilon, T) = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \right] \left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \right] \left[1 + D_5 T^* \right], \quad (3)$$

om treaxlighetsfaktorn σ^* är konstant. Treaxlighetsfaktorn definieras som kvoten mellan medelspänningen och effektivspänningen, dvs $\sigma^* = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3\sigma_{eff}}$. Vidare är $\dot{\varepsilon}$ den effektiva plastiska

töjningshastigheten och koefficienterna D_1 till D_5 är materialparametrar. Eftersom det inte är möjligt att uppskatta alla fem parametrarna från de experiment som är gjorda så valdes att endast variera parametrarna D_2 och D_3 i simuleringarna, övriga sätts till noll. Exempel på brottparametrar som förekommer för olika material (mestadels stål) ges i [9] till [12]. Några brottparametrar för volframlegeringar har dock inte gått att finna i litteraturen.

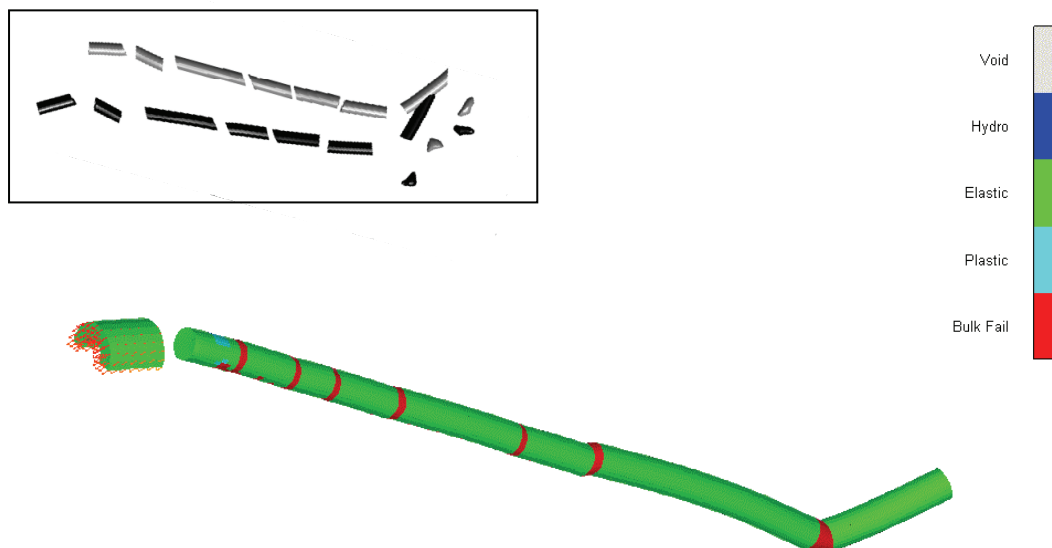
Om treaxlighetsfaktorn varierar som funktion av den plastiska effektivtöjningen ε ges skadevärdet (damage, D) av

$$D(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_f(\sigma^*(\varepsilon), \varepsilon(\varepsilon), T(\varepsilon))}. \quad (4)$$

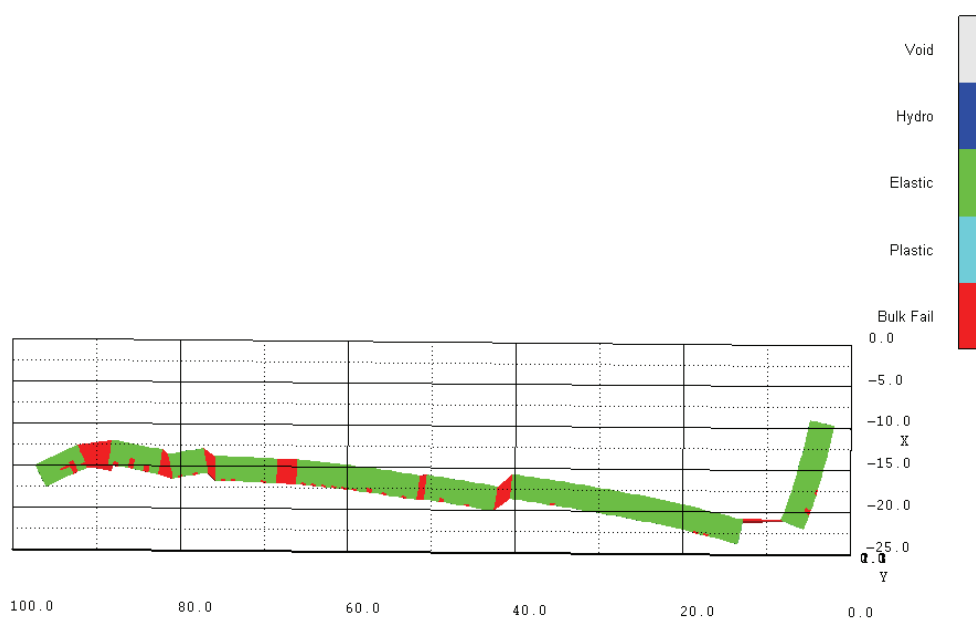
Det vill säga om treaxlighetsfaktorn, töjningshastigheten och temperaturen är given som funktion av den plastiska töjningen ε är det möjligt att beräkna skadevärdet som funktion av den plastiska töjningen. Brott uppstår när skadevärdet uppnår värdet ett. I detta fall blir flytspänningen noll och materialet kan endast uppta hydrostatiskt tryck.

Jämförelser mellan simuleringar med den förenklade modellen och experimenten i [1] tyder på att om $D_2 = 0,11$ och $D_3 = -3,4$ används fås ett relativt lika brottbeteende i simuleringarna som i experimenten, se figur 23-25.

I figur 23 visas brott i en projektil där brottparametrarna ovan har använts. I detta läge har hylsan som överför den konstanta transversalkraften (25 kN) precis lämnat projektilen efter 70 μ s. Fallet motsvarar en medflygande plåt med hastigheten 300 m/s (den första raden i Tabell IV). En jämförelse med experiment i [1] visar ett ganska likartat brottbeteende. I figur 24 visas samma fall men nu i sidovy efter 150 μ s (vilket motsvarar den tidpunkt när röntgenbilden tas). Figuren illustrerar även sidoförflyttningen då projektilen initialt befann sig i nollkoordinaten på x-axeln.

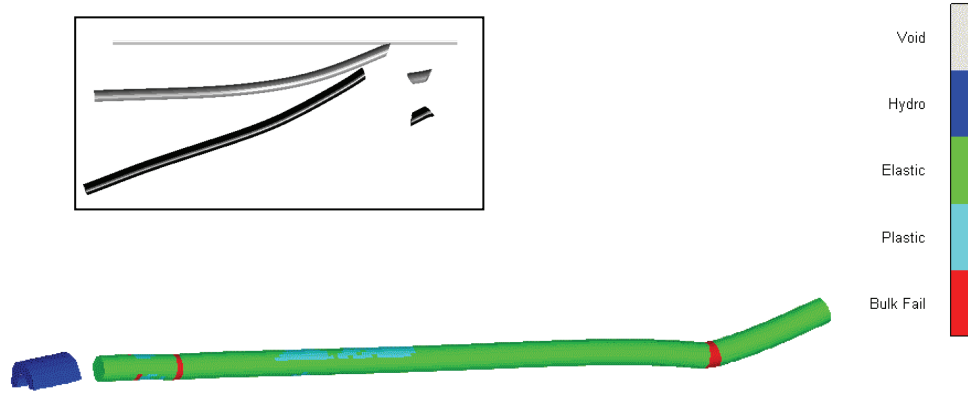


Figur 23. Exempel på brott i projektilen (transversalkraften rör sig från höger till vänster) efter 70 μ s. Infällt i övre högra hörnet syns den utvärderade röntgenregistreringen från motsvarande experiment vid 150 och 200 μ s [1].



Figur 24. Transversalkraft 25 kN, svephastighet 1400 m/s (motsvarar $v_{proj}=2000$ m/s och $v_{plåt} = -300$ m/s).

I figur 25 visas det fall som motsvarar en medflygande plåt med hastigheten 200 m/s (den andra raden i Tabell IV). Det framgår att det nu endast finns två brottställen på projektilen. Det första brottstället nära spetsen stämmer med experimenten i [1]. Det andra brottstället längre bak på projektilen stämmer dock inte med experimenten. För medflygande plåt med hastigheten 100 m/s (den tredje raden i Tabell IV) uppstår inget brott i projektilen, vilket stämmer med experimenten i [1].



Figur 25. Transversalkraft 22 kN, svephastighet 1600 m/s (motsvarar $v_{proj} = 2000$ m/s och $v_{plåt} = -200$ m/s).

För ytterligare bedömning av rimligheten i de valda parametervärdena beaktas vad dessa innebär för ett enaxligt dragprov ($\sigma^* = -1/3$). Ekvation (3) ger för ett enaxligt dragprov utan midjebildning en brotttöjning på 3,5% med $D_2 = 0,11$ och $D_3 = -3,4$. För så små brotttöjningar inträffar vanligen ingen midjebildning. Midjebildning medför att treaxlighetsfaktorn σ^* varierar med den plastiska töjningen, i början är den $1/3$ för att sedan öka något när midjebildning inträffar, se till exempel [13]. Simuleringarna ovan visar att på undersidan av projektilen är treaxlighetsfaktorn ungefär $1/3$, små oscillationer förekommer dock.

Midjebildning vid kvasistatisk belastning inträffar när $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$, det vill säga när

$$\frac{d(A + B\varepsilon^n)}{d\varepsilon} = A + B\varepsilon^n, \quad (5)$$

med parametrar enligt ekv. (1). Denna beräkning visar att midjebildning inträffar vid töjningen 5,6%, dvs brott (3,5%) inträffar innan midjebildningen. Brotttöjningen vid enaxligt tryckprov ($\sigma^* = -1/3$) blir 34 % vid användning av ekvation (3) och de valda parametervärdena. Detta innebär att brotttöjningen är nästan 10 gånger större vid tryckbelastning jämför med dragbelastning. Enaxliga tryckprov kan dock vara svåra att åstadkomma i praktiken.

Resultaten från den förenklade modellen har också jämförts med en fullständig simulering med både plåt och projektil. Båda metoderna gav ungefär lika skadeverkan på projektilen, bortsett från den överdrivna fragmentering i kontaktytan som tidigare påpekats. Detta förutsätter förstås att den transversalkraft som erhålls i den stora modellen (plåt plus projektil) används i den förenklade modellen.

Simuleringarna ovan har dels gett oss användbara parametervärden för i studien använda material vid bedömningar av brott i slanka pilprojektiler utsatta för snedbelastning, dels verifierat att svephastigheten ofta har större betydelse för brottbeteendet än storleken på transversalkraften.