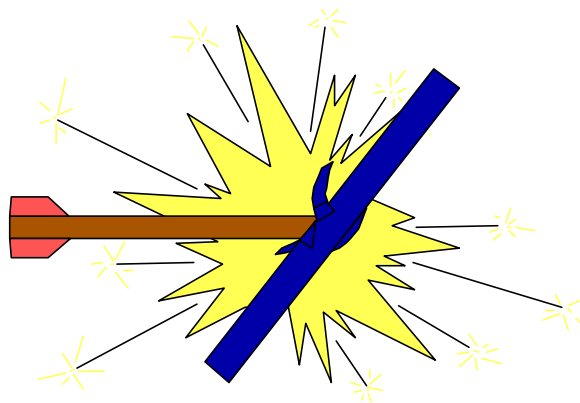


Ewa Lidén, Bo Johansson

## LÄGESRAPPORT

Pilprojektilers penetration av stillastående och rörliga  
snedställda plåtar



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSSINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--0531--SE

Juni 2002

ISSN 1650-1942

**Metodrapport**

Ewa Lidén, Bo Johansson

## LÄGESRAPPORT

Pilprojektilers penetration av stillastående och rörliga  
snedställda plåtar

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0531--SE	<b>Klassificering</b> Metodrapport
	<b>Forskningsområde</b> 5. Bekämpning	
	<b>Månad, år</b> Juni 2002	<b>Projektnummer</b> E2008
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 51 VVS med styrda vapen	
	<b>Författare/redaktör</b> Ewa Lidén Bo Johansson	
<b>Projektledare</b> Lars Holmberg		
<b>Godkänd av</b> Ralf T Holmlin		
<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM		
<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>		
<b>Rapportens titel</b> Lägesrapport. Pilprojektilers penetration av stillastående och rörliga snedställda plåtar		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Hur penetrerATION av snedställda rörliga eller stillastående plåtar påverkar pilprojektiler är av stort intresse eftersom många pansarkonstruktioner innehåller sådana komponenter i en eller annan form. Det kan vara alltifrån vanliga stillastående skiktade plåtar till reaktiva pansar och sensoraktiverade skydd med utkastade plåtar som verkansdel.  En experimentell metod för studier av växelverkan mellan pilprojektiler och sneda tunna plåtar, som bygger på omvända skjutförsök och Lagrange transformering av försöksuppställningen, har utvecklats. I denna lägesrapport beskrivs metoden och till en del de problem som förekommit i samband med metodutvecklingen. Därefter följer en beskrivning av inriktningen av de försök som pågår och avses genomföras med metoden och de kontinuumdynamiska simuleringar som gjorts i anslutning till detta.		
<b>Nyckelord</b> pilprojektiler, sneda plåtar, reaktivt pansar, sensoraktiverat skydd, penetration		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 22 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0531--SE	<b>Report type</b> Method report
	<b>Research area code</b> 5. Combat	
	<b>Month year</b> June 2002	<b>Project no.</b> E2008
	<b>Customers code</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Sub area code</b> 51 Weapons and Protection	
	<b>Author/s (editor/s)</b> Ewa Lidén Bo Johansson	
<b>Project manager</b> Lars Holmberg		
<b>Approved by</b> Ralf T Holmlin		
<b>Sponsoring agency</b>		
<b>Scientifically and technically responsible</b>		
<b>Report title (In translation)</b> Progress report. Long rod projectile penetration of stationary and moving oblique plates		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>Understanding long rod projectile interaction with oblique stationary or moving plates is important since most ballistic armours contain components of this type. This can be exemplified by spaced armour, reactive armour and sensor-activated armour using plates as the hard-kill component.</p> <p>To enable well-controlled studies of the interaction process, an experimental method using the reverse impact technique and a Lagrangian transformation of the experimental set-up has been developed. In the report, this method is described and some of the problems associated with the development are accounted for.</p> <p>Realised and planned experiments are described as are numerical simulations done in this context.</p>		
<b>Keywords</b> long rod projectiles, oblique plates, reactive armour, active armour, penetration		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 22 p.	
		<b>Price acc. to pricelist</b>

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BAKGRUND	5
EXPERIMENTELL METOD	6
Det kinematiskt ekvivalenta fallet	6
Fritt upplagd plåt	6
Fast inspänd plåt	11
Försöksseriens omfattning	14
Utvärderingsmetoder	15
Erhållna experimentella resultat	17
DATASIMULERINGAR	19
FORTSATT ARBETE	20
REFERENSER	21

## BAKGRUND

För ett antal år sedan påbörjades studier av effekterna av tungt reaktivt pansar på en pansarprojektil. Eftersom penetrationsförloppet är både komplicerat och våldsamt är det svårt att erhålla detaljerad information om förloppet vid skjutförsök med komplexa mål. Man kan utvärdera den slutliga effekten på projektilen men inte vad som hänt under penetrationsförloppet eller vilken del av pansaret som ger den utslagsgivande effekten. Genom att renodla problemet och studera effekten av de dominerande förloppen som ingår vid en projektils genomträngning av ett reaktivt pansar (penetration av motflygande resp medflygande plåt) kan även detaljförståelse erhållas. Explosivämnet bedöms i detta fall inte ha någon avgörande effekt på projektilen utan har endast till uppgift att kasta ut de ingående plåtarna åt varsitt håll.

Effekten på pilprojektiler vid penetration av tunna rörliga eller stillastående plåtar är dessutom av stort allmänt intresse eftersom många pansarkonstruktioner innehåller sådana komponenter i en eller annan form, alltifrån vanliga stillastående skiktade plåtar till sensoraktiverade skydd med utkastade plåtar som verkansdel.

Oavsett hur man kastar ut pansarets verkansdel är avsikten alltid att störa projektilen genom osymmetrisk belastning så att projektilen deformerar, snedställs eller slås sönder. Projektilen/projektildelarna kommer på så sätt att träffa grundpansaret fördelat över en större yta varvid belastningen per ytenhet, och därmed inträngningsförmågan, blir mindre.

Målsättningen med de pågående studierna är att förstå hur den rörliga plåten påverkar projektilen och vilka parametrar som påverkar utslaget kraftigast. Med sådan information kan man sedan föreslå en lämplig utformning på pansar avsedda mot KE-projektiler. Inledningsvis studeras det klassiska konceptet att en stålplåt kastas i sin normals riktning och att projektilen träffar plåten med en viss anslagsvinkel då plåten accelererat klart. Parametrarna plåthastighet och plåtvinkel studeras. Plåten kan röra sig antingen i riktning mot eller med projektilen.

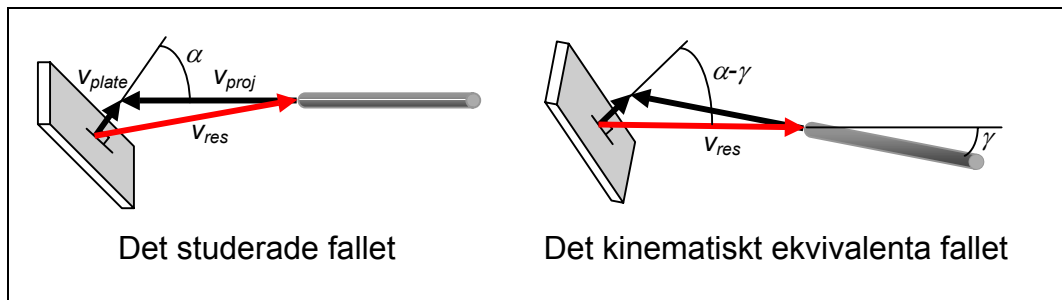
För att erhålla en första indikation på utfallet genomfördes simuleringar av förloppet med ett kontinuumdynamiskt simuleringsprogram [1]. Simuleringarna skulle ligga till grund för valet av försöksserie. Egna försök mot stationära tunna plåtar och i litteraturen redovisade försök [2-5] tyder på att det är svårt att genomföra försök med pilprojektiler mot sneda tunna plåtar utan att få stora spridningar i försöksresultaten. En viktig orsak till spridningarna är att projektilen pendlar vilket kan göra att den har en snedställning vid anslaget mot plåten. Detta kan ge så stora spridningar i resultaten att man har svårt att urskilja effekterna av parametervariationer i sina försöksserier. Vid studier av rörliga plåtars interaktion med pilprojektiler tillkommer problemet att trigga försöken med två rörliga kroppar så att växelverkanprocessen kan registreras.

En metod att kontrollerat studera växelverkan mellan en rörlig plåt och en pilprojektil är att använda så kallad omvänd försöksteknik [6-10] och Lagrangetransformation av parametrarna i det studerade fallet. En experimentell metod för sådana studier har utvecklats. Metoden går ut på att en snedställd plåt skjuts mot en snedställd stationär projektil. Genom att variera plåthastighet, plåt- och projektilvinkel kan det kinematiskt ekvivalenta fallet att en plåt kastas mot en flygande projektil studeras. Den stora fördelen med metoden är att den ger oss möjligheter att registrera förloppet under väl kontrollerade betingelser. Att utveckla denna metod har tagit lång tid och rönt många problem. Vi anser dock att metoden är nödvändig i en lång rad studier av delprocesser i pansarkonstruktioner vid interaktion med konventionella och okonventionella projektiltyper.

# EXPERIMENTELL METOD

## Det kinematiskt ekvivalenta fallet

Vi vill studera hur en lång slank tungmetallprojektil reagerar då den möter en utkastad plåt till exempel från ett reaktivt pansar. En Lagrangetransformation kan då användas vilket innebär att plåt- och projektilhastigheten överförs till ett referens-koordinatsystem där plåten är den enda kroppen i rörelse. Projektil och plåt roteras med koordinatsystemet så att projektilen står i en bestämd vinkel mot plåtens hastighetsriktning, se figur 1.



**Figur 1.** Transformation av koordinatsystemet. I det studerade fallet är två kroppar i rörelse (svarta hastighetsvektorer) medan det i det ekvivalenta fallet endast är en kropp i rörelse (röd hastighetsvektor).

Varje parameteruppsättning av plåthastighet, plåtvinkel och projektilhastighet i det studerade fallet ger en specifik uppsättning parametrar i det ekvivalenta fallet och kan beräknas enligt

$$\gamma = \arctan\left(\frac{v_{plate} \sin \alpha}{v_{proj} + v_{plate} \cos \alpha}\right)$$

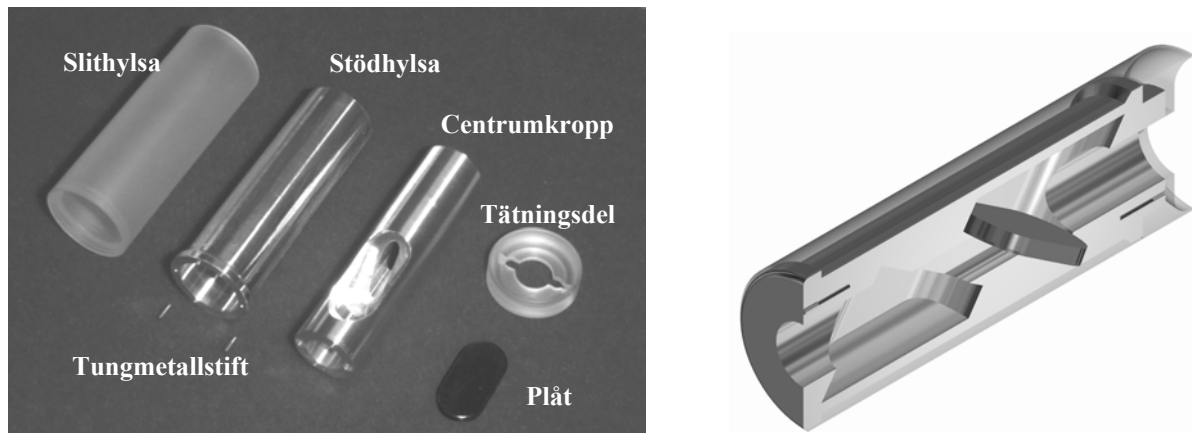
$$v_{res} = \frac{v_{proj} + v_{plate} \cos \alpha}{\cos \gamma}$$

där  $\gamma$  och  $v_{res}$  är projektilens snedställningsvinkel resp plåtens hastighet i det ekvivalenta fallet, och  $v_{plate}$ ,  $v_{proj}$  och  $\alpha$  är plåthastigheten, projektilhastigheten och plåtvinkeln i det studerade fallet.

## Fritt upplagd plåt

Vår ursprungliga ambition var att studera en fri plåt, utan någon inspänning, i växelverkan med en pilprojektil. En drivspegel för utskjutning av en fri plåt togs fram och testades under 1997 och 1998. Projektilhastigheterna i dessa försök var 1500 resp 2500 m/s i det studerade fallet vilket innebär att plåthastigheten i experimenten skulle variera mellan 1500 och 1803 m/s resp 2500 och 2784 m/s (endast motflygande plåtar studerades). För att erhålla dessa hastigheter användes en lättgaskanon med 30 mm eldrör.

Vår strävan var att den fritt upplagda plåten skulle vara form- och lägesbeständig och för att uppnå detta placeras plåten som drivplatta i en drivspegel bestående av en centrumkropp och en stödhylsa av höghållfast aluminium samt en slithylsa och en tätningssdel av polykarbonat.



**Figur 2.** Drivspegel för utskjutning av fritt upplagd plåt. Till vänster de olika komponenterna som bildar den sammansatta drivspegeln som visas som sprängskiss till höger.

Centrumdelen har ett liv som stöd för plattan och hål för den snedställda projektilens passage. Stödhylsan skall hålla ihop drivspegeln och slithylsan utgöra slityta mot eldröret. Tätningssdelen sitter längst bak på drivspegeln och ska förhindra att drivgasen tränger förbi drivspegeln vid utskjutningen. Stödhylsan förses med två stycken tungmetallstift i samma plan, ett i framänden och ett i bakänden av hylsan. Med hjälp av dessa kan vi registrera om och i så fall hur mycket drivspegeln roterat i samband med utskjutningen.

I centrumkroppens bakände borrar två hål för ett vridverktyg så att drivspegelns/plåtens horisontalläge kan vridas in med stor noggrannhet. Figur 3 visar hur drivspegeln, efter att ha skjutits in i eldrörets bakände, justeras in med vridverktyg och vinkelmätare.



**Figur 3.** Injustering av drivspegel i eldröret.

Plåten är oval med längdaxlarna 27,2 resp 15,8 mm och tjockleken 3 mm och är tillverkad av pansarstål SIS 2541-3, med materialdata enligt tabell 1.



**Tabell 1.** Materialdata för plåt

Stål SIS 2541-3	
Densitet:	7800 kg/m <sup>3</sup>
Sträckgräns:	700 MPa
Brottgräns:	900 - 1100 MPa
Brottöjning:	12%
Hårdhet:	HB 270-325

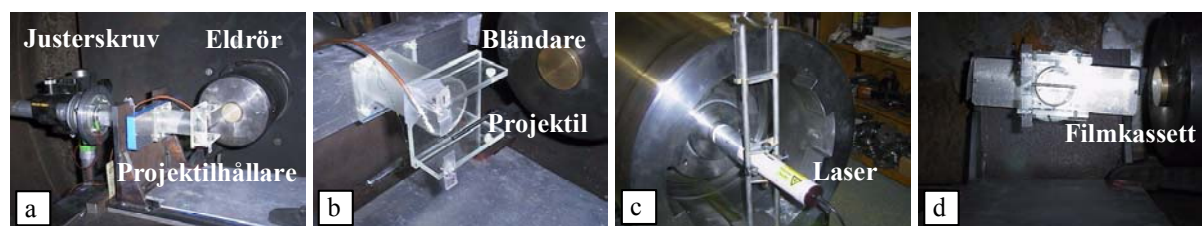
Projektilen som ska hänga i en bestämd vinkel framför eldrörsmynningen är en rät cylinder med diametern 3 mm och längden 45 mm ( $L/d=15$ ) utan spets, fenor eller gängor. Materialet i projektilen är tungmetall av kvaliteten DX2HCMF från Pechiney. Materialdata framgår av tabell 2.

**Tabell 2.** Materialdata för projektil

Projektilmaterial DX2HCMF	
Sammansättning:	93%W - 4,5% Ni - 2,5% Fe
Behandling:	Kallbearbetad
Densitet:	17 600 kg/m <sup>3</sup>
Sträckgräns:	1 050 MPa
Brottförlängning:	8%
Hårdhet:	HV 420

Projektiländen som vänds mot eldröret poleras så att planet är vinkelrätt mot projektilens centrumaxel och så blank att ytan kan spegla en laserstråle med liten distortion. Därefter limmas projektilen fast på två tunna polymertrådar som är spända över en projektilhållare. En monteringsjigg används för att säkerställa att projektilen hamnar rakt och centralt i hållaren. På projektilhållaren fästes triggrådar som ska utlösa registreringsutrustningen under skott.

Projektilhållaren med sin projektil placeras i en hållare med injusteringskruvar i tanken i lättgaskanonanläggningen, figur 4. På projektilhållarens axel monteras också en filmkassett, figur 4d. En mätlaser placeras i eldrörets botre ände och mynningen förses med en bländare. Projektilens läge kan nu injusteras med stor noggrannhet. Första steget är att mäta in projektilen rakt i skottlinjen. Detta görs genom att eldrörlasern reflekteras mot den polerade projektiländen så att reflexen sammanfaller med utgångshålet i bländaren. Då projektilen är korrekt inmätt vrids sedan hela hållaren till önskad vinkel med vridinstrumentet.

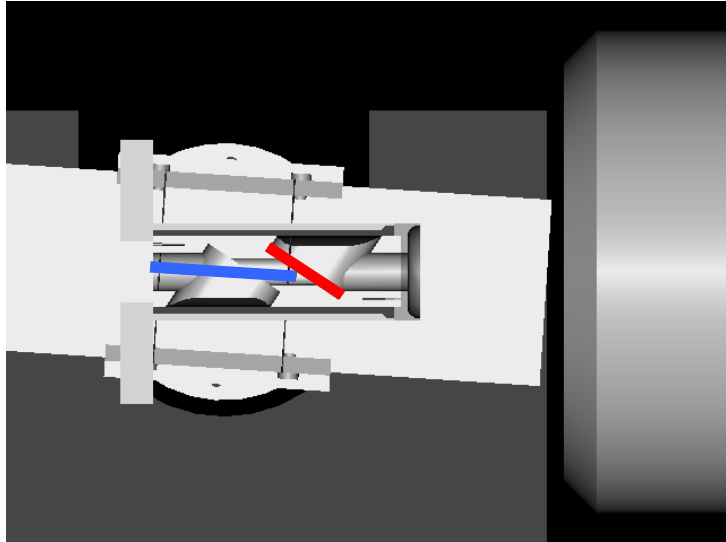


**Figur 4.** Injustering av projektilen framför eldrörsmynningen. a) Projektilhållare med förmonterad projektil monteras tillsammans med filmkassett på hållaren med injusteringskruvar. b) Med hjälp av en laserstråle genom bländaren i eldrörsmynningen injusteras projektilens läge rakt i skottlinjen. c) Lasern i eldrörets bakre ände. d) Projektil och filmkasset vridna till den förbestämda vinkeln.

De önskade resultaten från försöken är uppgifter om hur projektilen rör sig och deformeras till följd av kollisionen med plåten. Dessutom vill vi kontrollera att plåt och projektil befinner sig i rätt läge vid träff, samt att plåten har rätt hastighet. Röntgenblitsteknik används för samtliga dessa registreringar. Höghastighetsfilmning med Imaconkamera har provats utan framgång varefter vi helt inriktat oss på röntgenblitströregistreringar.

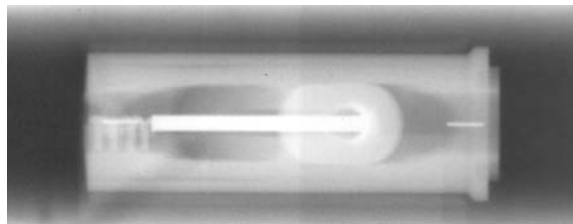
Plåt och projektil fångas upp mjukt i board och skumplast så att vi kan studera och materialkaraktärisera dem.

För trigging av mätutrustningen används tunna isolerade koppartrådar som monteras på projektilhållaren så att drivspegelns framände träffar och kortsluter dem samtidigt som projektil och plåt möts, figur 5.



**Figur 5.** Genomskärningsbild av drivspegeln då den lämnat eldröret och hunnit fram i det läge där plåten (rödmarkerad) träffar projektilen (blåmarkerad). Projektilhållaren har försetts med två stycken plastbleck på vilka triggrådarna limmats. Drivspegel träffar blecken med trådarna samtidigt som projektilen träffar plåten varvid triggrådarna kortsluts.

Direkt vid trigg tas en genomlysningssbild av drivspegeln rakt uppifrån där vi kan kontrollera att träffen varit symmetrisk och att drivspegeln inte roterat, figur 6.



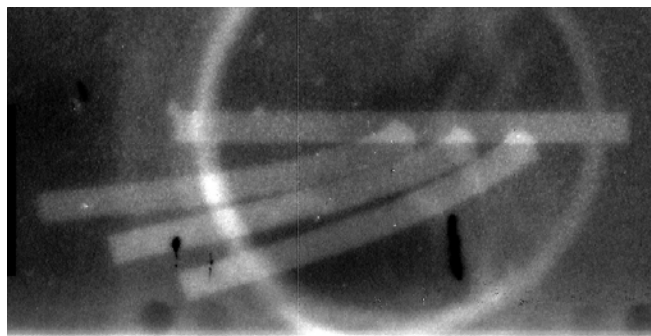
**Figur 6.** Genomlysningssbild av drivspegel med plåt då projektilen just träffats och börjat penetrera plåten. Bilden tagen med 450 kV röntgenblix. Bilden används för att kontrollera att drivspegeln inte roterat och att projektilen inte rört sig ur sitt läge.

Eftersom projektilen står stilla och plåten kommer med hög hastighet kommer plåten att passera projektilen och endast överföra en begränsad hastighet till projektilen. Vi låter plåt och drivspegel passera och studerar restprojektilen och dess rörelse genom att registrera restprojektilen vid tre olika tider på en och samma film. Röntgenblixtar monteras i horisontalplanet mot måltankens utsida, figur 7. Filmen laddas i en filmkassett som sitter på projektilhållarens axel varvid filmen roteras med projektilen.

Före skott exponeras filmen med den mittersta röntgenblixten vilket ger en referensbild av den opåverkade projektilen. Vid skott utlöses blixterna med tidsfördröjningarna 100, 150 resp 200  $\mu$ s från anslag. Figur 8 visar ett exempel på hur resultatbilden kan se ut.

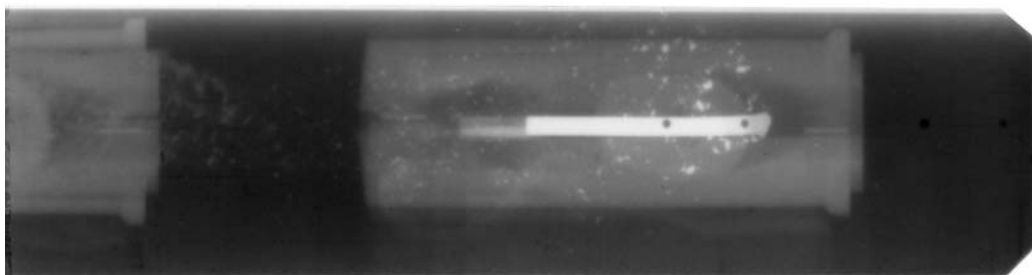


**Figur 7.** Röntgenblixtrar monterade på måltankens utsida och filmkassett inne i tanken.



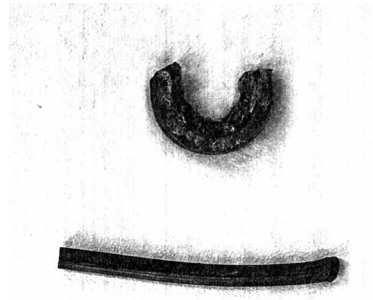
**Figur 8.** Röntgenblixtbild som visar en referensexponering av projektilen före skott samt tre exponeringar av restprojektilen efter skott. 3 stycken 150 kV röntgenblixtrar har använts.

För registrering av drivspeglens hastighet monterades ytterligare en röntgenblixtr på tanktaket bakom blixten för symmetrikontroll. Kontrollbilden kan på så sätt även utgöra den första bilden för hastighetsregistreringen, figur 9. Den andra blixten fördröjs med den tid det tar för drivspegeln att förflytta sig mitt för denna blixtr om drivspegeln har den avsedda hastigheten. Vi får alltså en film med två exponeringar av drivspegeln med känd tidsfördröjning och kan räkna ut hastigheten på drivspegeln.



**Figur 9.** Röntgenblixtbild med två exponeringar av drivspegeln för utvärdering av plåthastighet. Den högra exponeringen är en genomlysning som också används som kontrollbild. I detta fall ser vi att drivspegeln roterat en aning.

Projektilen och plåten fångas upp mjukt genom att hela tanksystemet fylls upp med frigolit och board. Projektilen kan relativt lätt hittas oskadad eftersom dess hastighet är så låg. Plåten däremot kan vara svårare att fånga upp utan att den slås sönder. Figur 10 visar ett exempel på hur plåt (halv) och projektil kan se ut efter skott.



**Figur 10.** Mjukt uppfångad plåt och projektil efter skott. Plåten har i detta fall gått av på mitten i samband med uppbromsningen.

## Fast inspänd plåt

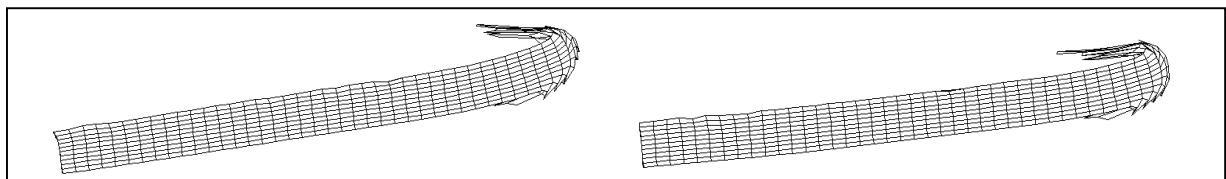
Allt för många försök med fritt upplagd plåt misslyckades. Framför allt hade vi mycket krångel med trigging av registreringsutrustningen. Den komplicerade drivspegelutformningen var dyr och tidskrävande att tillverka och vi misstänkte att de försökstekniska problemen kunde bero på gasläckage mellan drivspegel och den lösa plåten.

En alternativ drivspegel med fast inspänd plåt utvecklades. Projektilhastigheten ändrades samtidigt i det studerade fallet till att alltid vara 2000 m/s. För att möjliggöra större variation i de studerade parametrarna, utan att projektilen ligger för nära plåtens ränder, ändrades projektildiametern från 3 till 2 mm med bibehållet längd-diameterförhållande. För att kunna jämföra resultat från många olika delstudier inom detta område används genomgående plåtar med samma tjocklek som projektildiametern. På grund av svårigheter vid nyanskaffning av det tidigare använda projektilmaterialet valdes istället ett relativt likvärdigt material, Y925KH från Kennametal Hertel, se tabell 3.

**Tabell 3.** Materialdata för projektil

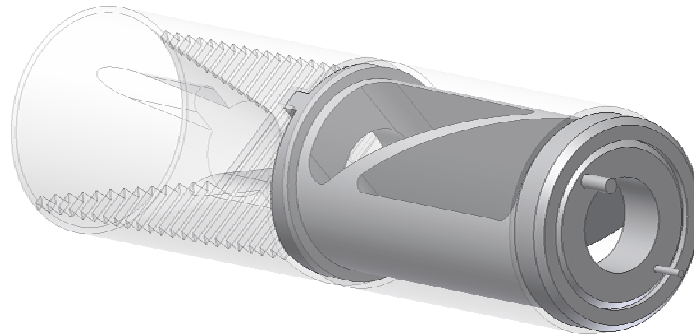
Projektilmaterial Y925KH	
Sammansättning:	92,5% W – Ni, Fe, Co okänt
Behandling:	Kallbearbetad
Densitet:	17 700 kg/m <sup>3</sup>
Sträckgräns:	1 342 Mpa
Brottförlängning:	10%
Hårdhet:	480 HV10

Skillnaden i restprojektilens uppförande efter penetration av en fast inspänd och en fritt upplagd plåt studerades med hjälp av Autodyn-simuleringar, figur 11. Skillnaden i uppträdande var så liten att vi ansåg oss kunna använda en fast inspänd plåt i experimenten.



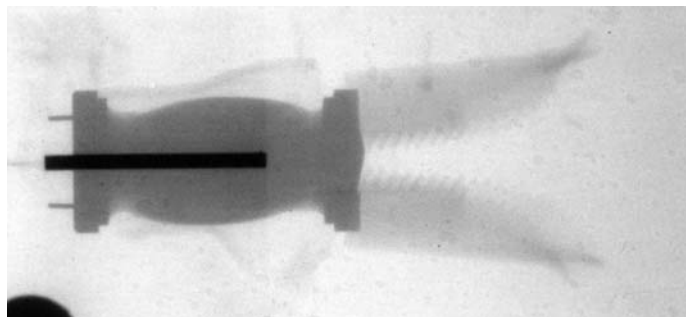
**Figur 11.** Restprojektilens utseende 150  $\mu$ s efter passage av fast inspänd (till vänster) resp fritt upplagd (till höger) plåt, enligt kontinuumdynamiska simuleringar med Autodyn.

Den nya drivspegeln består av en målkropp av stål där den sneda plåten är integrerad i konstruktionen, en låsring av stål, en slithylsa och en tvådelad drivplugg av polykarbonat, se figur 12. Två stycken tungmetallstift monterade i drivspegelns framände används för att kontrollera drivspegelns rotation i samband med utskjutningen. De två stiften har olika diametrar vilket medger bestämning av drivspegelns rotationsriktning.



**Figur 12.** Drivspiegel med fast inspänd plåt.

Då den nya drivspegeln accelereras med drivgaserna verkande på en drivplugg är ett nödvändigt krav att dess delar separerar så fort att de är ur vägen för projektilen. Kontaktytan mellan målkroppen och drivpluggen är vinklad  $10^\circ$  för att underlätta denna separering, se figur 13. Drivpluggsseparationen sker enbart med hjälp av drivgaserna från eldröret eftersom måltanken är nerpumpad till 20 mbar. Detta ger relativt korta separeringstider för drivpluggen, i vårt fall räcker det med ca 300 mm avstånd mellan eldrörets mynning och pilens position för en säker drivpluggsseparation.

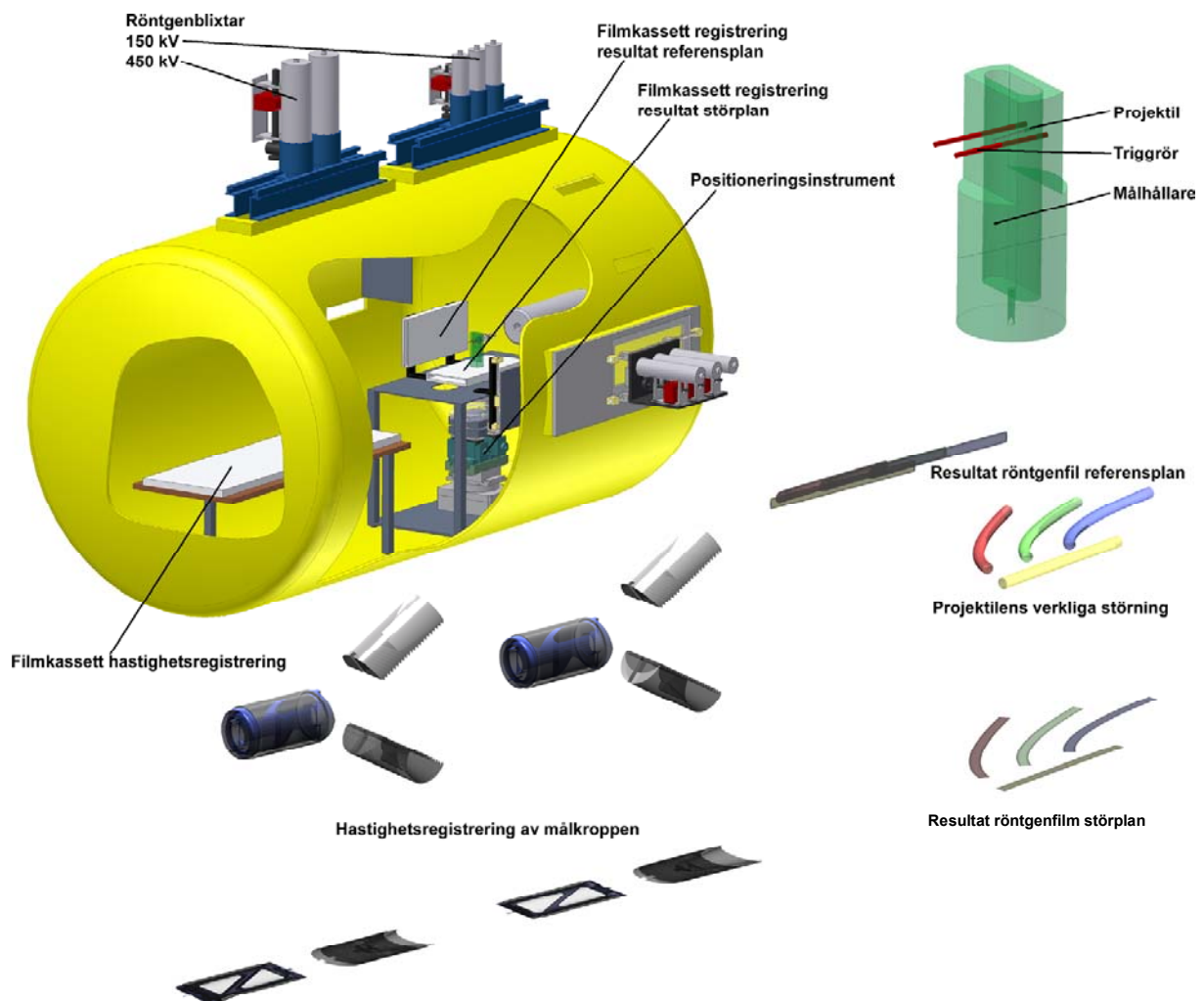


**Figur 13.** Röntgenblixregistrering som visar hur drivpluggen separerar och lämnar plats för projektilen att passera opåverkad av drivpluggen.

I drivpluggen finns ett spår för ett injusteringsverktyg så att drivspegeln kan vridas in rakt med stor noggrannhet i eldrörets bakände.

I samband med framtagandet av den nya drivspegeln modifierades även skjutuppställningen, se figur 14. Den nya typen av målhållare är betydligt billigare och enklare att tillverka än den gamla och den nya positioneringsutrustningen och dess placering medger noggrannare och enklare positionering av projektilen. Även triggmetoden har förbättras.

För trigging används två triggtrådar vilka träs genom och limmas fast i två tunna rör. Rören möjliggör en enklare och säkrare positionering av triggtrådarna. Då drivspegelns framände träffar någon av triggtrådarna kortsluts denna och initierar registreringsutrustningen. Att endast ett av rören behövs innebär att vi har ett redundant system för trigging.



**Figur 14.** Experimentell uppställning. Överst till höger visas en förstoring av målhållaren. Under tanken visas resultatet från röntgenregistreringarna. 150 kV blixterna avbildar projektilens störning i två plan och 450 kV blixterna avbildar målkroppen för uppmätning av hastigheten.

Projektil och triggrådar monteras i en målhållare i form av en divynycell-cylinder med så låg densitet och hållfasthet att den inte påverkar resultatet. Projektileten monteras i den avsedda vinkeln redan i målhållaren för att triggrådarna ska ligga vinkelrätt mot skottlinjen efter invridning av projektileten.

Målhållaren limmas direkt på kassetthållaren för röntgenblixtfilm vilken i sin tur är monterad direkt på positioneringsinstrumentet. Detta medger en enkel injustering av projektileten och att bilden av restprojektileten alltid hamnar mitt på röntgenfilmen. Positioneringsinstrumentet har fem frihetsgrader, tre translatoriska och två för rotation. Projektileten i sin målhållare justeras in rakt i skottlinjen med hjälp av en laserstråle som reflekteras i projektiländens blankpolerade yta. För att förenkla injusteringen av laserstrålen koncentriskt i eldröret används ett pentaprisma. Lasern är monterad under och vinkelrätt mot eldröret så att laserstrålen träffar prismet som leder in strålen i eldröret. Projektilens läge justeras till dess att strålen reflekteras tillbaka till samma punkt från projektiländens. Därefter vrids projektileten till avsedd vinkel. Före injusteringsförfarandet har filmkassetthållaren vridits negativt den avsedda vinkeln vilket efter injusteringen resulterar i att filmen ligger parallellt med skottlinjen.

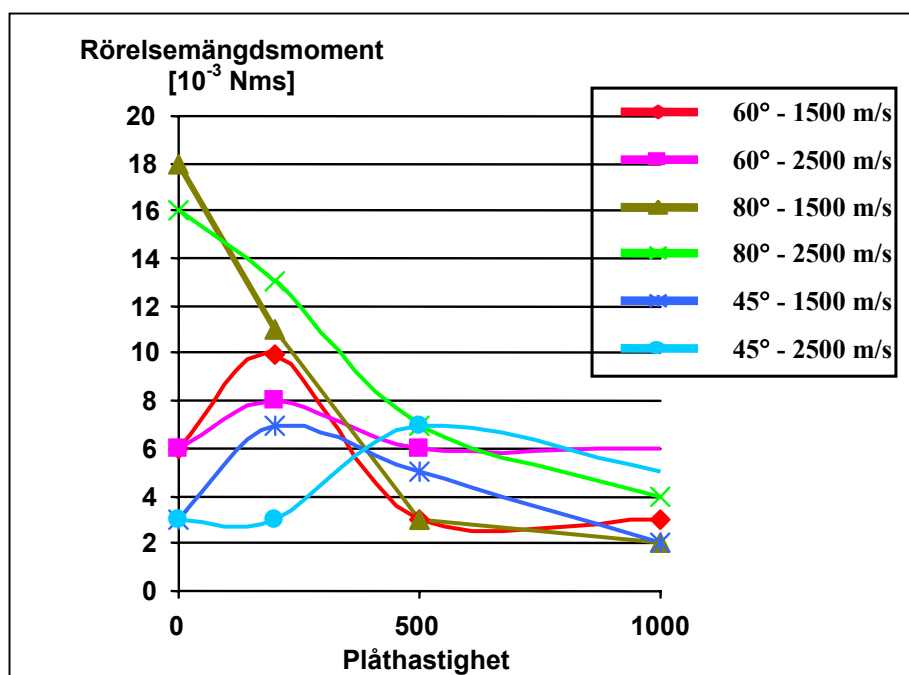
Liksom vid försöken med fritt upplagd plåt registreras restprojektilens utseende med hjälp av 150 kV röntgenblixter 100, 150 och 200  $\mu$ s efter anslag mot plåten och hastigheten bestäms

med två röntgenblixregistreringar av drivspegeln efter passage av projektilen. I den nya försöksuppställningen studeras restprojektilen i två vinkelräta plan med hjälp av totalt 6 stycken 150 kV röntgenblixstar varav tre är placerade på måltankens tak och de resterande tre är placerade mot måltankens sida, se figur 14. Röntgenblixstarna för hastighetsregistrering och kontroll av drivspegelrotation är placerade på måltankens tak ca 1 m bakom projektilens ursprungliga position.

I denna försöksuppställning har vi inte möjlighet att ta någon genomlysningssbild av drivspegeln vid träffen mellan plåt och projektil eftersom antalet tillgängliga blixstar är begränsat. Vi har heller ingen möjlighet att mjukt bromsa upp plåten för studier av plåtmaterial och hållkanal efter skott. Eftersom plåten sitter fast i centrumkroppen kommer den bli totalförstörd i samband med en inbromsning.

## Försöksseriens omfattning

Första delstudien med den framtagna experimentella metoden har som mål att fastställa inverkan av plåthastighet och plåtvinkel på pilprojektilen. Såväl med- som motflygande plåtar med hastighet från 0 till 1000 m/s och en lutningen på 0 till 80° kan vara av intresse. De inledande simuleringarna med motflygande plåt tydde på att inflytandet av dessa parametrar kan vara olinjära, se diagram i figur 15.



**Figur 15.** Delresultat från Autodyn-simulering av interaktionen mellan tunn snedställd rörlig plåt och pilprojektil. Utvärdering av restprojektilens rörelsemängdsmoment, 150  $\mu$ s efter anslag mot plåt, som funktion av plåthastighet. Kurvscharan representerar plåtvinklarna 45, 60 och 80° och projektilhastigheterna 1500 och 2500 m/s.

Den misstänkta tendensen till lokala maxima i utvärderingsstorheterna gör att vi bedömer att det är viktigare att studera inverkan av plåthastigheten i ett stort antal steg vid *en* projektilhastighet och *en* plåtvinkel (2000 m/s resp 60°) än att studera ett vidare hastighetsområde. Såväl medflygande, motflygande som stillastående plåt studeras. Därefter kontrolleras att tendenserna från den serien stämmer även för andra plåtvinklar, 30° och 75°.

Den försöksserie som vi avser genomföra framgår av tabell 4. Projektilhastigheten är i samtliga fall 2000 m/s medan plåtvinkel och plåthastigheten varierar enligt tabellen. Den största plåtvinkel begränsades från 75 till 70° av tillverkningstekniska skäl.

**Tabell 4.** Försöksseriens omfattning

Plåt- vinkel	Plåthastighet [m/s]										
	-500	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	500
0											
15											
30											
45											
60											
70											

Parametrarna projektilhastighet, plåthastighet och plåtvinkel omvandlas till det kinematiskt ekvivalenta fallets parametrar som blir våra skjutparametrar, se tabell 5

**Tabell 5.** Skjutparametrar i det kinematiskt ekvivalenta fallet med utskjuten plåt och stillastående projektil.

Studerat fall			Skjutparametrar		
$V_{proj}$ [m/s]	$V_{plåt}$ [m/s]	$\alpha$ [°]	$V$ [m/s]	$\alpha_{plåt} = \alpha - \gamma$ [°]	$\alpha_{proj} = \gamma$ [°]
2000	300	60	2166	53,1	6,9
	200		2107	55,3	4,7
	100		2052	57,6	2,4
	0		2000	60	0
	-100		1952	62,5	-2,5
	-200		1908	65,2	-5,2
	-300	1868	68,0	-8,0	
	200	30	2176	27,4	2,6
	0		2000	30	0
	-200		1830	33,1	-3,1
	200	70	2077	64,8	5,2
	0		2000	70	0
-200	1941		75,6	-5,6	

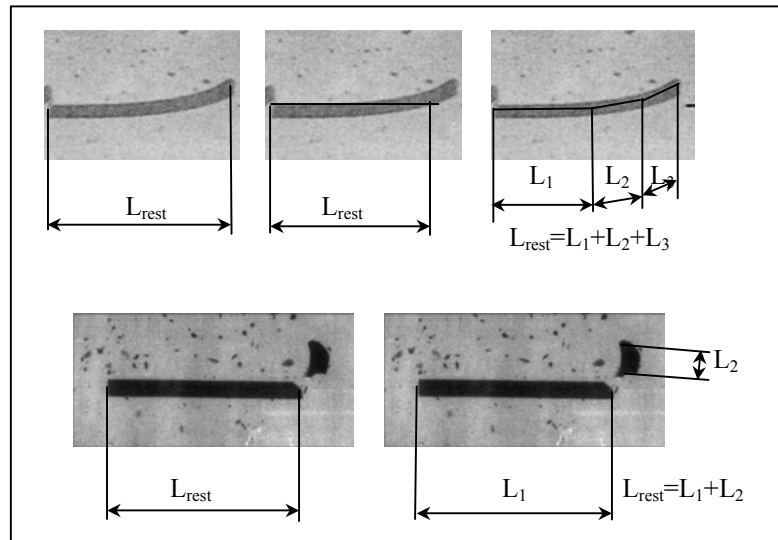
Den experimentella uppställningen ger vinklarna  $\alpha_{proj}$  och  $\alpha_{plåt}$  utan spridning. Hastigheten på drivspegeln med sin inbyggda plåt kan dock sprida från det nominella fallet. Maximalt tillåten spridning fastställdes till  $\pm 50$  m/s. Det har visat sig att drivspegeln ibland roterar vid utskjutningen vilket innebär att plåten inte kastas ut i sin normalriktning utan träffar projektilen med två snedställningsplan. Storleken på accepterad rotationsvinkel bestämdes i början av försöksserien till ca 5°. Senare ändrades detta värde till 10°, se nedan. Kontrollbilderna av restprojektilen vinkelrätt mot det plan i vilket utslaget ska ske används för att kontrollera att inga okända avvikelser uppkommer i försöket.

## Utvärderingsmetoder

Hastighet och eventuell rotation hos drivspegeln utvärderas direkt ur röntgenblyxbilderna. Svårare är att bestämma hur egenskaperna hos restprojektilen ska utvärderas. Vid tidigare försök med stationära sneda plåtar och simuleringar med stationära och rörliga plåtar har restlängd, resthastighet och rörelsemängdsmoment utvärderats. Rörelsemängdsmoment används istället för projektilens snedställning eftersom snedställningen beror av avståndet från störplåten. Även vinkelhastigheten har utvärderats men måste då relateras till ett visst avstånd bakom plåten.



Redan att utvärdera restprojektilens längd kan vara besvärligt eftersom projektilen ibland är kraftigt krökt och snedställd och ibland sönderslagen i nosen. Några alternativ till definition av restprojektilens längd visas i figur 16. I våra utvärdering används den ackumulerade längden dvs de högra alternativen i figur 16. Alla större fragment tas med i utvärderingen.

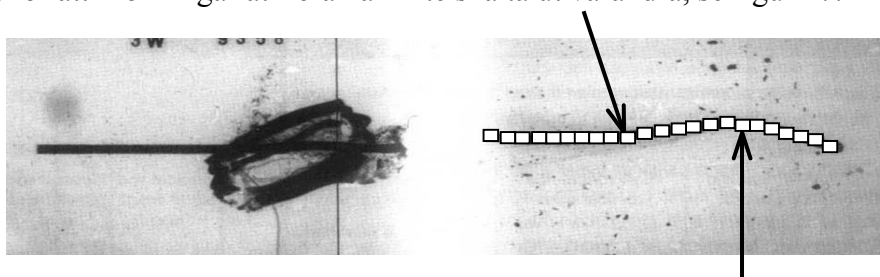


**Figur 16.** Alternativa sätt att utvärdera restprojektilens längd. Ovan visas tre alternativa utvärderingar av en hel böjd projektil och nedan två alternativa utvärderingar av en projektil med avslaget nosfragment.

Ett annat mått som kan vara av intresse är projektilens krökning. Något sådant mått har tidigare inte utvärderats av oss eller vad vi funnit i litteraturen. Vi avser att införa begreppet ”ackumulerad krökning” som skulle definieras som

$$K = \sum \left| \frac{1}{R} \right| \Delta s$$

där R är krökningsradien och  $\Delta s$  är längden av ett delement av projektilen. Absolutbeloppet tas med för att krökningar åt flera håll inte ska ta ut varandra, se figur 17.



**Figur 17.** Utvärdering av restprojektilens krökning. Krökningsradiens centrum kan ligga på varierande sida av restprojektilen utefter projektilens längd

Röntgenbilderna av restprojektilen vid tre tidpunkter i två vinkelräta plan utnyttjas för att skapa en 3-dimensionell bild av restprojektilen. Ett datorprogram skrivet i MATLAB för 3-dimensionell visualisering av restprojektiler är under utveckling. Röntgenbilderna skannas och plockas in i ett delprogram för manuell bestämning av projektilens kanter. Projektildelar från de två bildplanen paras ihop och positionen för den 3-dimensionella bilden beräknas. Dessa data kan sedan användas för att beräkna restlängd, resthastighet, rörelsemängd och ackumulerad krökning.

## Erhållna experimentella resultat

Serien med lös plåt övergavs på grund av allt för stora försökstekniska problem.

En första försöksomgång med fast inspänd plåt genomfördes varvid en av 70°-drivspegelarna kollapsade och en deformerades kraftigt. Registreringen missades i ett fall och hastighetsavvikelsen överskred 50 m/s i 2 fall. Drivspegelrotationen var större än 5° i alla utom ett av de i övrigt lyckade skotten, se tabell 6.

**Tabell 6.** Erhållen hastighet och rotation på drivspegeln att jämföra med de nominella skjutparametrarna, relaterat till det ursprungliga studiefallet.

Studerat fall			Skjutparametrar			Erhållna data	
$V_{proj}$ [m/s]	$V_{plåt}$ [m/s]	$\alpha$ [°]	V [m/s]	$\alpha_{plåt}$ [°]	$\alpha_{proj}$ [°]	V [m/s]	$\alpha_{rot}$ [°]
2000	300	60	2166	53,1	6,9	2226	5,9
	200		2107	55,3	4,7	2103	9,1
	100		2052	57,6	2,4	1621	10,3
	0		2000	60	0	1994	6,1
	-100		1952	62,5	-2,5	1942	10,6
	-200		1908	65,2	-5,2	1935	0,4
	-300		1868	68,0	-8,0	1861	13,7
	200	30	2176	27,4	2,6	2131	17,2
	0		2000	30	0	1924	0,8
	-200		1830	33,1	-3,1	-	-
	200	70	2077	64,8	5,2	2037	9,2
	0		2000	70	0	2043	10,8
	-200		1941	75,6	-5,6	2007 *	

\* Drivspegel kollapsad

Vi beslutade stryka vinkeln 70° ur studien eftersom drivspegeln blev för lång och vek.

Uppkomna hastighetsavvikelser innebär att såväl projektilhastigheten som plåthastigheten ändras med en förhållandevis lika stor faktor. Rotationen innebär att plåtens utkastningshastighet kan uppdelas i en komponent i dess normalriktning och en i plåtens plan. Plåten kommer alltså att belasta projektilen med en extra snedkraft tvärs projektilhastigheten.

Hur stora avvikelserna i hastighet och plåthastighetsriktning blir i det tillbakaräknade fallet (från fallet med rörlig plåt och stationär projektil till rörlig plåt mot rörlig projektil) framgår av tabell 7.

För att utreda om den extra snedställningen av plåten, som drivspegelrotationen innebär, har någon avgörande betydelse för restprojektilens uppträdande genomfördes en andra försöksserie. Genom att skjuta flera skott med samma skjutparametrar hoppades vi få olika rotation i de olika skotten varvid skillnaden i restprojektilens uppträdande skulle kunna utvärderas. I dessa nya försök uppkom ingen eller ringa drivspegelrotation. Däremot erhöles stora restprojektilrörelser i kontrollplanet. En utredning av hur stora drivspegelrotationer som kan accepteras genomfördes varvid 10° vridning av drivspegeln vid tiden för röntgenblyxtregistreringen fastställdes som acceptabel [11].

**Tabell 7.** Projektilhastighet ( $v_{proj}$ ), plåthastighet ( $v_{plåtursp}$ ) och plåthastighetens avvikelse från plåtnormalens riktning ( $\gamma$ ) då resultaten från experiment genomförda med rörlig plåt mot stillastående projektil omvandlats tillbaka till det ursprungliga fallet med rörlig projektil mot rörlig plåt. I försöken med 70°-plåt deformerades eller kollapsade drivspegel varför dessa ströks ur studien.

Önskat fall			Erhållet omräknat fall				
$V_{proj}$ [m/s]	$V_{plåt}$ [m/s]	$\alpha$ [°]	$V_{proj}$ [m/s]	$V_{plåtursp}$ [m/s]	$V_{plåt\,norm}$ [m/s]	$V_{plåt\,L}$ [m/s]	$\gamma$ [°]
2000	300	60	2055	308	307	27	5
	200		1996	200	198	27	8
	100		1580	79	78	12	9
	0		1994	0	0	0	-
	-100		1990	-99	-98	-16	9
	-200		2028	-203	-203	-1	0
	-300		1993	-299	-293	-61	12
	200	30	1959	196	194	29	8
	0		1924	0	0	0	-
	-200		-	-	-	-	-
	200	70	1961	196	194	30	9
	0		2043	0	0	0	-
	-200		2069	-207	-	-	-

För närvarande försöker vi systematiskt utreda vilka försökstekniska avvikelser som kan ge upphov till de relativt stora störningar i kontrollplanet som uppkom i den senare försöksserien. Tippning av drivspegeln och/eller avvikelse mellan önskad och erhållen hastighetsriktning vid utträdet från eldröret och att projektilen rör sig före anslag mot plåten är möjliga källor till observerade avvikelser från förväntade resultat.

Vi har kompletterat försöksserien ovan så att vi nu har godkända resultat i alla försökspunkter. Utvärdering av restlängd, resthastighet, rörelsemängd och ackumulerad krökning kommer att genomföras så snart utvärderingsprogrammet är klart.

# DATASIMULERINGAR

Numeriska simuleringar har genomförts i ett antal omgångar. Genomgående används programmet AUTODYN 3D [12] med Lagrangekoordinater. För både projektil och plåt användes en linjär tillståndsekvation och Johnson & Cook konstitutiva ekvation [13]. Tabell 8 visar de värden som använts i beräkningarna. Ingen brottmodell användes för projektilmaterialet medan ”bulk strain” användes som brottmodell för plåtmaterialet.

**Tabell 8.** Använda materialdata för projektil- och projektilmaterial vid genomförda simuleringar.

	Tungmetall	Stål (SIS 2541-03)	Enhet
Densitet	17.7	7.82	g/cm <sup>3</sup>
Bulkmodul	200	172	GPa
Referenstemperatur	293	293	K
Specifikt värme (C.V.)	1.34E-4	4.77E-4	KJ/gK
Skjuvmodul	150	79	GPa
Sträckgräns	1.342	0.75	GPa
Härdnandekonstant	0.351	1.15	GPa
Härdnandeexponent	0.25	0.49	
Töjningshastighetskonstant	0.018	0.014	
Termiskt mjuknande	0.59	1	
Smälttemperatur	1723	1700	K
Erosionstöjning	12	None	%

Resultat från simuleringar av stillastående och motflygande plåt med varierande vinkel och hastighet mot släta pilprojektiler med L/D=15 och hastigheten 1500 resp 2500 m/s har presenterats i [1]. Motsvarande resultat för såväl stillastående, mot- som medflygande plåt i växelverkan med projektil med hastigheten 2000 m/s redovisas i [14]. En studie av inverkan av slankhetstal och projektilmaterial har genomförts och redovisats i [14].

Simuleringarna med stillastående plåt visar att restprojektilens uppförande överensstämmer väl med experimentella resultat. I experimenten fragmenteras projektilspetsen i vissa fall medan det i simuleringarna, där ingen brottmodell används, inte kan förekomma någon fragmentering av projektilen. Trots detta överensstämmer form och uppträdande hos restprojektilen.

Förutom jämförelse mellan simuleringar och experiment har simuleringarna använts vid uppläggnings av försöken genom att simuleringensresultaten antyder vilket intervall i parameteruppsättning som kan antas vara intressant att studera.

Vid motflygande plåt tycks fördelarna med rörlig plåt vara begränsade medan medflygande plåt ger betydligt större inverkan på projektilen. Nyligen utförda experiment bekräftar denna tendens som kan bero på den längre interaktionstiden mellan projektil och plåt vid medflygande plåt.

Eftersom framtidens pilprojektiler förväntas ha betydligt större slankhetstal än 15 simulerades effekterna av stora slankhetstal, 30 resp 45. Endast studier av stillastående plåt har genomförts. Dessa simuleringar visar att studier av projektiler med L/D=15 är relevanta eftersom den främre delen av projektilen påverkas likartat i de olika fallen. För de slanka projektilerna kommer dock den bakre delen av projektilen att i stort sätt förbli opåverkad. För att förstå belastningsfall och penetrationsprocessen är de knubbiga projektilerna intressanta att använda. Vid utvärdering av möjliga skyddseffekter är det intressant att studera slankare projektiler. Möjligheterna att experimentellt studera projektiler med stora slankhetstal mot rörliga plåtar med den omvända skjuttekniken är dock begränsad till eldrörets kaliber.

## FORTSATT ARBETE

Resultaten från de genomförda grundserien kommer att utvärderas med avseende på restlängd, resthastighet, rörelsemängd och ackumulerad krökning och redovisas som en vetenskaplig artikel. Några ytterligare metodförsök för att fastställa noggrannheten i försöksmetoden kommer att genomföras. Därefter hoppas vi kunna använda den framtagna experimentella metoden till att studera fler parametrar vid förlopp som avser att slå sönder eller störa ut pilprojektiler. T ex kan inverkan av rörliga eller stillastående tunna plåtar på projektiler med olika geometri såsom olika slankhetstal, olika typer av gängor, fenor och spetsar och helt nya okonventionella utformningar som rörformade projektiler, teleskopprojektiler eller segmenterade projektiler studeras.

På simuleringssidan ska vi först jämföra erhållna experimentella resultat med de redan genomförda simuleringarna. Kanske kan man som för stillastående plåtar få tillfredställande resultat angående restprojektilens uppträdande utan någon brottmodell för projektilmaterialet. Eftersom vi studerar effekter som har för avsikt att bli att slå sönder projektilen är det dock angeläget och troligen nödvändigt att få fram en lämplig brottmodell för projektilmaterialet i denna tillämpning.

När vi fått klart för oss vilka effekter som uppstår på restprojektilen vid denna typ av belastning bör studier av de sneda, sönderslagna restprojektilernas möjlighet att penetrera grundpansaret genomföras. Slutresultatet ska förstås bli att kunna uttala oss om hur man effektivast kan störa ut en pilprojektil med denna typ av tilläggs skydd samt hur en projektil kan utformas för att motstå denna typ av belastning.

## REFERENSER

1. Lidén E., Ottosson J. and Holmberg L.: "WHA long rod penetrating stationary and moving oblique steel plates", Proc 16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco, CA, USA, pp 703-711, 1996
2. Holmberg L., Lundberg P. and Westerling L.: "An experimental investigation of WHA long rods penetrating oblique steel plates", Proc 14th Int. Symp. on Ballistics, Quebec, Canada, pp 515-524, 1993
3. Hohler V., Schneider E., Stilp A. J. and Tham R.: "Length- and Velocity Reduction of High Density Rods Perforating Mild Steel and Armour Steel Plates", Proc 4th International Symposium on Ballistics, Monterey, CA, USA, Vol 1, 1978
4. Bruchey W. J., Ricchiazzi A. J. and Roecker E. T.: "Fibre-reinforced Materials for High Density Penetrators", Proc 6th Int. Symp. on Ballistics, Orlando, Florida, USA, Vol 1, 1981
5. Lynch N. J.: "An Assessment of the Penetration Performance of Four Tungsten Alloys against a Triple Plate Target", European Forum on Ballistics of Projectiles, Saint-Louis, France, 2000
6. Hauver G. E.: "Experiments with Instrumented Long-Rod Penetrators", Proc 5th Int. Symp. on Ballistics, Toulouse, France, 1980
7. Forde L. C., Bourne N. K., Rosenberg Z., Cornish R., Lynch N. J., Cullis I. G. and Church P. D.: "Experimental Investigation and Analysis of Penetration in Oblique Impact", Proc 16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco, CA, USA, Vol 3, pp 641-649, 1996
8. Bless S. J.: "Transverse Loads on a Yawed Projectile", Int. J. Impact Engng., 23(1):77-86, 1999
9. Normandia M. J.: "Eroded Length Model for Yawed Penetrators Impacting Finite Thickness Targets at Normal and Oblique Incidence", Int. J. Impact Engng., 23(1):663-674, 1999
10. Bless S., Subramanian R., Normandia M. and Campos J.: "Reverse Impact Results for Yawed Long Rods Perforating Oblique Plates", Proc 18th Int. Symp. on Ballistics, San Antonio, Texas, USA, Vol 2, pp 693-701, 1999
11. Lidén E., Andersson O. and Johansson B.: "Influence of the direction of flight of moving plates interacting with long rod projectiles", 20th Int. Symp. on Ballistics, Orlando, Florida, USA, 2002
12. Birnbaum N.K., Cowler M.S., Itoh M., Katayama M. and Obata H.: "AUTODYN an Interactive Non-linear Dynamic Analysis Program for Microcomputers through Supercomputers," 9th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, Switzerland, 1987.

13. Johnson G. R. and Cook W. H.: "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, Large Strain Rates, and High Temperatures", Proc 7th Int. Symp. on Ballistics, Hague, Holland, pp 541-547, 1983
14. Ottosson J.: "Numerisk studie av inverkan av medflygande plåt samt projektilens hållfasthet och geometri för ett reaktivt pansar", FOA Memo 99-5523/S, 1999