

FFI RAPPORT

KE-penetrasjon i panserstål - Artikkelgjennomgang og simuleringer

Kvifte, Lars

FFI/RAPPORT-2003/01799

FFIBM/798/139

Godkjent
Kjeller 8 mai 2003

Stein Grinaker
Forskningsjef

**KE-penetrasjon i panserstål
- Artikkelgjennomgang og simuleringer**

Kvifte, Lars

FFI/RAPPORT-2003/01799

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/01799	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 57
1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/798/139	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE KE-penetrasjon i panserstål - Artikkelgjennomgang og simuleringer Long Rod Penetration in Homogenous Steel - Literature Survey and Simulations		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) Kvifte, Lars		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: IN NORWEGIAN:		
a) <u>Autodyn</u>	a) <u>Autodyn</u>	
b) <u>Simulation</u>	b) <u>Simulering</u>	
c) <u>Steel Plates</u>	c) <u>Stålplater</u>	
d) <u>KE-penetrator</u>	d) <u>KE-penetrator</u>	
e) _____	e) _____	
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT As a part of FFI-project 798 "Anti-Armour Weapons beyond 2000" a study of active protection systems (APS) has been performed. APS protects armoured objects from the full effect of anti-tank (AT) missiles, and possibly APFSDS and other kinetic energy (KE) weapons. The three components that build up an APS system are: a sensor system, a main computer, and a weapon system (effector). Today's APS is designed to handle the AT-missile threat only. Defeating APFSDS and KE-weapons in general remains a challenge. In this report our aim is to investigate the potential of flying steel plates, serving as effector for an APS system, in protecting against such threats. A literature survey has been conducted resulting in a collection of formulas describing penetration in homogenous armour. Though "real life" targets are multi-layered, such formulas are valuable, since they can be used to study which parameters to influence in order to get the largest possible reduction in penetration depth. Several Autodyn simulations have been performed, in which a large steel block was the main target. Before hitting this target, however, the KE-penetrator had to perforate a thin steel plate. In case 1 and 2 the KE-penetrator had either a considerable angle of attack or yaw, whereas the steel plate was stationary. In case 3 the KE-penetrator had zero angle of attack and no yaw and was hit by a fast-moving, tilted steel plate. Roughly speaking we found that the KE-penetrator's performance was not significantly reduced until the steel plate's angle of attack exceeded 45° and plate thickness well exceeded 10 mm.		
9) DATE 8. May 2003	AUTHORIZED BY This page only Stein Grinaker	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0725-2

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	ARTIKKELGJENNOMGANG	7
2.1	Pilens lengde	11
2.2	Pilens hastighet	12
2.3	Pilens L/D -forhold	13
2.4	Pil med yaw	13
2.4.1	Pilens degradering som funksjon av pilens yaw og hastighet	17
2.4.2	Pilens degradering som funksjon av pilens yaw og L/D -forholdet	18
2.5	Pil som brytter	20
2.6	Pil som bøyes	21
2.7	Pilens styrke	22
2.8	Målets hardhet	23
2.9	Skalaforsøk	25
2.10	Oppsummering av teori	26
3	SIMULERINGSRESULTATER FRA AUTODYN	27
3.1	Kort om Autodyn	27
3.2	Penetrasjon i halv-uendelig stålblokk	28
3.2.1	Sammenligning med eksperimentelle verdier	29
3.3	Skrått anslag mot stillestående plate	30
3.3.1	Resultater	31
3.3.2	Pilens hastighet	33
3.3.3	Pilens fartsretning	35
3.3.4	Pilens vinkelhastighet	36
3.3.5	Pilens yaw	36
3.3.6	Erosjon av pilen	38
3.3.7	Bøyning av pilen	38
3.3.8	Total reduksjon i penetrasjonsdybde	38
3.4	Pil med yaw mot stillestående plate	40
3.4.1	Resultater	40
3.4.2	Pilens hastighet	41
3.4.3	Pilens fartsretning	42
3.4.4	Pilens vinkelhastighet	42
3.4.5	Pilens yaw	42
3.4.6	Erosjon av pilen	43
3.4.7	Bøyning / oppbrekking av pil	44
3.4.8	Total reduksjon i penetrasjonsdybde	45
3.5	Pil mot bevegelig ståplate	47
3.5.1	Resultater	47

3.5.2	Diskusjon av resultater	53
4	KONKLUSJON	53
	Litteratur	55
	FORDELINGSLISTE	57

KE-penetrasjon i panserstål - Artikkelgjennomgang og simuleringer

1 INNLEDNING

Prosjekt 798 "PB2000+" har blant annet som mål å skissere et taktisk konsept for panserbekjempelse (PB). Dagens konsept er ikke nødvendigvis tilpasset den teknologiske utviklingen, som blant annet har gitt mulighet for panserbekjempelse i tre dimensjoner; med direkteskytende systemer, med krumbanevåpen og med minelignende systemer.

Et nytt konsept for panserbekjempelse vil påvirkes av sårbarheten til de pansrede målene. Delprosjekt 1 har derfor blant annet som oppgave å evaluere målenes aktuelle beskyttelsestiltak og anslå hvilken effekt disse kan ha mot forskjellige PB-våpen. Det er kjent at det allerede finnes aktive beskyttelsessystemer (APS) som fungerer relativt bra mot missilsystemer. Systemene har imidlertid begrenset virkning mot stridsvogners pilammunisjon (APFSDS¹) og fremtidens hypervelocity-missiler (HVM). Hvilken ytelse som kan ventes av fremtidige APS-systemer, er i større grad uklart.

Et APS-system består i all hovedsak av tre deler: et sensorsystem, en regneenhet og et våpensystem (effektor). Siden det er våpendelen som faktisk bekjemper trusselen, så er det den som bestemmer den maksimale ytelsen systemet kan oppnå. En rekke våpentyper / motmidler kan tenkes brukt. Viktige eksempler er fragmenterende granater / kassetter, stålplater i bevegelse, sprenggranater og hullladninger. Prosjektet ønsker å avklare potensialet til alle de nevnte motmidlene. Denne rapporten har imidlertid en noe snevrere ambisjon. Vi vil her begrense oss til å studere stålplaters ytelse mot pilammunisjon / HVM. Stålplatenes tykkelse, hastighet og vinkel vil bli variert. Siden en rekke forsøk og undersøkelser tidligere er utført utenfor FFI, presenteres også en del formler og resultater hentet fra litteraturen.

Rapporten består av to hoveddeler. Mens den første delen, kapittel 2, redegjør for resultater funnet i artikler fra perioden 1990 til 2000, presenterer rapportens andre del, kapittel 3, resultater fra en rekke simuleringer utført under prosjektet. Programmet som ble benyttet til simuleringene, Autodyn, vil bli nærmere beskrevet i kapittel 3.

2 ARTIKKELGJENNOMGANG

Virkningsdelen i HVM er en såkalt kinetisk energi penetrator (KE-penetrator). Siden dette strengt tatt bare er en tyngre og hurtigere versjon av dagens APFSDS, kommer vi ikke til å skille mellom begrepene KE-penetrator og pil. Når materialer, form og bevegelse er gitt for

¹ Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot

både mål og pil, da kan penetrasjonsevnen studeres.

Når vi i det videre ønsker å studere effekten til forskjellige piler, må vi være i stand til å måle penetrasjonsevnen. Det er imidlertid en rekke størrelser det kan måles på. Noen eksempler er:

- Radien, dybden og vinkel til hullet som dannes
- Volumet og massen til materialet som er slitt vekk fra målet
- Energien som er overført fra pilen til målet

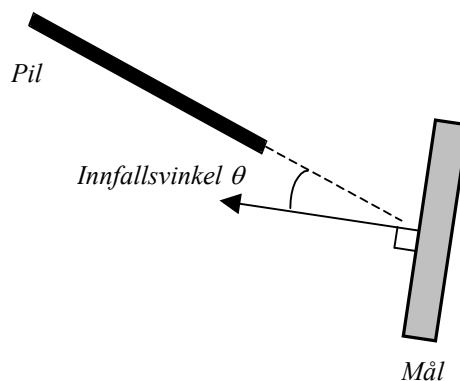
Det er vanligst å oppgi prosjektillets penetrasjonsdybde. Grunnen til dette ligger i at man ut fra penetrasjonsdybden hurtig kan avgjøre om prosjektilet utgjør en trussel mot et bestemt mål.

Prinsipielt ønsker vi prosjektillets virkning bak pansringen, siden det er der de verdifulle delene av et mål befinner seg. Det viser seg imidlertid at et prosjektil som perforerer en pansring, oftest har så stor restvirkning at virkningen i målet blir stor nok. Siden et mål perforeres når penetrasjonsdybden blir større enn pansertykkelsen, er det lett å se hvorfor nettopp penetrasjonsdybden er blitt en så sentral størrelse.

For å vite den eksakte penetrasjonsdybden til et prosjektil, må skyteforsøk utføres. Det finnes imidlertid formler som gir gode anslag. En formel som er vanlig i bruk, er gitt av Lanz / Odermatt (1). Denne angir den normerte, maksimale pansertykkelsen, som et prosjektil klarer å perforere:

$$\frac{P}{L} = \left\{ 1 + 3.77 \cdot \frac{1 - \tanh \frac{L/D - 10}{6.89}}{L/D} \right\} (\cos \theta)^{-0.255} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_T}} \cdot e^{-\frac{25.9R}{\rho_p \cdot v^2}} \quad (2-1)$$

Innfallsvinkelen θ er definert i figuren under:



Figur 2-1: Innfallsvinkelen angir vinkelen mellom pilens akse og målets normal. (Dette betyr at vi måler innfallsvinkelen i NATO grader).

De øvrige symbolene står for:

P	Penetrasjonsdybde [mm]
L	Pilens lengde [mm]
D	Pilens diameter [mm]
v	Pilens hastighet idet den treffer målet [m/s]
ρ_p	Pilens tetthet [kg/m ³]
ρ_r	Målets tetthet [kg/m ³]
R	Målets strekkstyrke [N/m ²]

Formelen over har fire empiriske parametre. For langstrakte piler som treffer normalt på et mål, forenkles formelen ofte til:

$$\frac{P}{L} = a \cdot e^{-\left(\frac{b}{v}\right)^2} \quad (2-2)$$

Her er:

P	Penetrasjonsdybde [mm]
L	Pilens lengde [mm]
v	Pilens hastighet [m/s]
a, b	Empiriske konstanter

Istedenfor å måle pansertykkelsen som akkurat gir gjennomslag, kan man måle dybden på det hullet man får når man skyter på et svært tykt mål. Det at pilen ikke skal perforere pansringen gjør skyteforsøkene enklere. Behovet for nøyaktig beregning av hvilken pansertykkelse som skal benyttes i skyteforsøkene, samt måling av resthastighet til de pilene som faktisk perforer pansringen, faller bort. Vi gjør imidlertid oppmerksom på at de to skisserte målemetodene ikke vil gi helt identiske verdier (pga randeffekter). Videre i rapporten refereres det hovedsakelig til penetrasjonsdybden i svært tykke, såkalte halv-uendelige, mål.

Videre i kapittel 2 kommer vi til å studere forskjellige parametre som er viktige for pilens penetrasjonsdybde. Denne kunnskapen er viktig av flere grunner:

- Man vet når formelverket gir tilstrekkelig presise svar, slik at dyre simuleringer og skyteforsøk kan unngås
- Kunnskapen gjør at urimelige simuleringsresultater kan lukes ut
- Man kan få ideer til hvordan et APS-system kan redusere virkningen av KE-penetratorer / piler (Det viser seg for eksempel at penetrasjonen påvirkes sterkt av hvor skjevt pilen flyr. En mulighet for et APS-system er derfor å påvirke pilen slik at den flyr enda skjevtere.)

Fremgangsmåten vi har valgt, når vi i de neste avsnittene beskriver forskjellige parametre, baserer seg på såkalt én-parameter-analyse. Dersom vi for eksempel ser på betydningen av pilens lengde L , da varierer vi L , mens alle andre parametre holdes fast. Denne fremgangsmåten får frem hvordan penetrasjonen øker når pilens lengde øker, men den ignorerer det faktum at slike ensartede variasjoner så å si aldri skjer i virkeligheten. Det at en pil gjøres lengre, vil for eksempel bety at den også blir tyngre. Når massen til pilen endres, må dette igjen påvirke enten pilens hastighet eller dens energi. Én-parameter-analyse kan gi urimelige resultater dersom variasjonene gjøres store, og de neste avsnittene bør leses med dette i minnet.

En oppsummering av avsnittene 2.1 til 2.9 gis i avsnitt 2.10. Vi forsøker der å antyde hvilke parametre som er spesielt sentrale. Parametrene som behandles i avsnittene 2.1 til 2.9, er gitt i Tabell 2-1:

Faktorer som påvirker penetrasjonsevnen		Kommentar	Behandles i avsnitt:
Pilens geometri	Lengde		2.1
	Diameter	I formler for penetrasjonsdybden er det vanlig å benytte forholdet mellom pilens lengde og diameter L/D	2.3
	Spissens form	Pilens form har spesielt betydning for om pilen preller av pansringen ved store innfallsvinkler.	Ikke behandlet
	Tverrsnittets form	Pilens stivhet avhenger blant annet av formen på pilens tverrsnitt	Ikke behandlet
Pilens bevegelse	Hastighet		2.2
	Innfallsvinkel	Vinkelen mellom pilens akse og en normal til målet	Ikke behandlet i kapittel 2
	Yaw	Vinkel mellom pilens akse og fartsretningen. Dvs størrelsen beskriver hvor skjevt pilen flyr	2.4
Materialvalg	Tetthet for mål og pil		Ikke behandlet
	Strekkestyrke for mål og pil	Betydning for om pilen brykker	2.5
		Betydning for om pilen bøyes	2.6
		Betydning for penetrasjonsdybden	2.7/2.8
Skalæffekter		I skyteforsøk skytes mindre versjoner av pilene som man ønsker å studere. Det er ikke gitt at penetrasjonen minsker med samme faktor som pilen er forminsket.	2.9

Tabell 2-1: Faktorer som påvirker pilens penetrasjon. Hvilke faktorer som blir behandlet i de neste delkapitlene, er angitt i den siste kolonnen i tabellen.

2.1 Pilens lengde

Når en pil av tungmetall penetrerer en stålblokk, regner man grovt sett med at penetrasjonsdybden øker proporsjonalt med lengden på pilen:

$$P = k \cdot L \quad (2-3)$$

Her er:

- P Penetrasjonsdybde [mm]
- L Pilens lengde [mm]
- k Proporsjonalitetsfaktor som avhenger av flere parametre, som for eksempel hastighet

Det antas her at størrelser som for eksempel hastighet, diameter og innfallsvinkel holdes konstant, mens pilens lengde varieres.

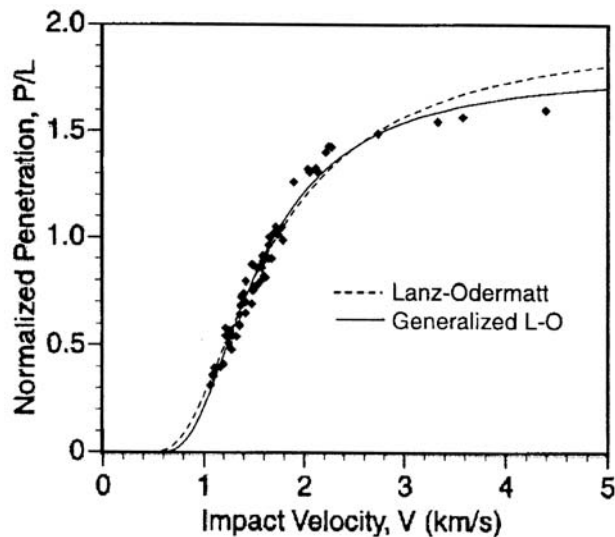
Formelen kan gi inntrykk av at økt lengde garanterer økt penetrasjon. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet, siden formelen ikke har et ubegrenset gyldighetsområde. Utenfor gyldighetsområdet vil vi typisk være når pilen er så lang at den lett brykker eller blir svært bøyd. Det er også verd å merke seg at en pil som forlenges, og som ikke samtidig slankes, vil bli stadig tyngre. Det betyr igjen at det vil kreve stadig mer energi å gi pilen en bestemt

hastighet.

2.2 Pilens hastighet

For hastigheter i regimet fra 0.9 til 1.8 km/s har eksperimenter vist at penetrasjonsdybden øker tilnærmet lineært med hastigheten (2), (3). Vi vet også at det eksisterer en minste hastighet som er slik at det ikke blir penetrasjon for hastigheter under denne. For svært store hastigheter kommer penetrasjonsdybden stadig nærmere en verdi som ofte kalles den hydrodynamiske grense. Denne asymptotiske verdien avhenger blant annet av pilens L/D -forhold og tettheten til pil og mål.

Fra (4) har vi hentet Figur 2-2 som viser penetrasjonsdybdens hastighetsavhengighet. Denne figuren gjengir data for en pil med et forhold mellom lengde og diameter på 20:



Figur 2-2: Penetrasjonsdata for en wolframpil med $L/D=20$. Pilen treffer et halv- uendelige stålmål. Figuren er hentet fra (4).

I (4) er det gitt en generalisert Lanz-Odermatt funksjon som blir tilpasset dataene gitt i Figur 2-2. Funksjonen er av typen:

$$\frac{P}{L} = Ae^{\left[-(b/v)^c(1+K/D)^{1/2}\right]} \quad , \text{ der} \quad (2-4)$$

P Penetrasjonsdybde [mm]

L Pilens lengde [mm]

v Pilens hastighet [km/s]

D Pilens diameter [mm]

A, b, c, K Empiriske parametre som bestemmes ved kurvetilpasning

$$A=1.767$$

$$b=1.147$$

$$K=3.066$$

$$c=2.403$$

Figur 2-2 viser at det kan være gunstig å øke pilens hastighet opp mot 3 km/s, men at hastigheter utover dette kun i liten grad forbedrer penetrasjonsytelsen.

2.3 Pilens L/D -forhold

For å optimalisere penetrasjonsdybden i panser, ønsker man å konsentrere mest mulig energi på et minst mulig område. Dette betyr at pilene gjerne bør være lange og tynne. Med stor lengde L og liten diameter D er dette det samme som å si at det er gunstig å ha en pil med en høy verdi på forholdet L/D . Samme konklusjon følger for øvrig også av påstanden i avsnitt 2.1 om at penetrasjonsdybden øker med lengden på pilen. Dersom pilens masse er gitt, må diameteren slankes for at pilen skal kunne forlenges.

Når en pil gjøres lengre, får vi to effekter som konkurrerer. Penetrasjonsdybden øker med pilens lengde, men minsker samtidig med pilens "slankhet" (En pil som får økt sitt L/D -forhold blir mindre stiv, og dermed påvirkes penetrasjonsevnen). Når en pil designes, blir det derfor viktig å optimalisere forholdet mellom pilens lengde og diameter.

Hvordan penetrasjonsdybden avhenger av L/D -forholdet, er studert i litteraturen. I ligning (2-5) under, gjengir vi sammenhengen som er funnet i (5). Parametrene i dette uttrykket baserer seg på eksperimenter med piler av wolfram som penetrerer halv-uendelige stålmål. Datapunktene inkluderer L/D -forhold fra 10 til 30 og hastigheter fra 1.0 til 1.8 km/s.

$$\frac{P}{L} = -0.209 + 1.044v - 0.194 \ln\left(\frac{L}{D}\right) \quad (2-5)$$

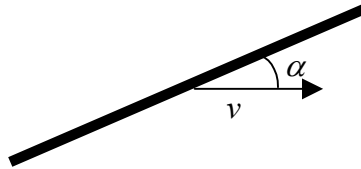
Her står symbolene for:

P	Penetrasjonsdybde [mm]
L	Pilens lengde [mm]
D	Pilens diameter [mm]
v	Pilens hastighet [km/s]

Vi ser at formelens siste ledd $\ln(L/D)$ faller bort dersom pilens lengde og diameter blir like store. Dette betyr at variasjoner i pilens diameter er langt viktigere for tynne enn for tykke piler.

2.4 Pil med yaw

En pil har yaw dersom pilens akse ikke faller sammen med fartsretningen. Dette er illustrert i Figur 2-3:



Figur 2-3: En pil med hastighet v og yaw på α° .

Når en pil uten yaw treffer normalt på et mål, er det hovedsakelig pilspissen som slites / eroderes. Pilen berører da bare bunnen av det krateret som dannes og krateret blir relativt smalt og dypt.

Når en pil derimot har mye yaw, vil vi se at også den bakre delen av pilen treffer kraterveggen (Figur 2-4). Dette gjør at også denne delen av pilen eroderes og at penetrasjonsdybden minsker. Siden pilen også eroderer kraterveggen, vil krateret som dannes bli bredere.

For å avgjøre om den bakre delen av pilen vil berøre kraterveggen, må vi vite diameteren på krateret for tilfellet der pilen er uten yaw. Ifølge (6) finnes ingen gode analytiske modeller for denne diameteren. Eksperimenter viser imidlertid at diameteren er svært hastighetsavhengig, og man kan tilpasse data til en funksjon av hastigheten v . En rekke slike kurvetilpasninger er funnet i (6), (7):

$$\frac{R_c}{R_p} = 1 + 0.70v \quad (2-6)$$

$$\frac{R_c}{R_p} = 1 + 0.2869v + 0.145v^2, \quad (2-7)$$

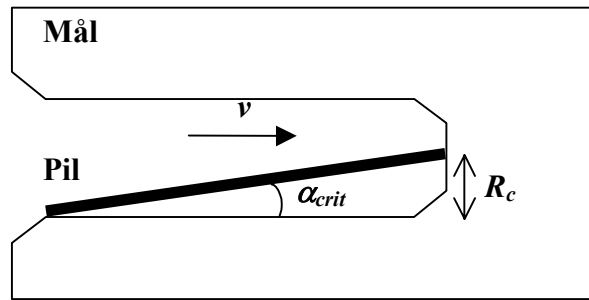
$$\frac{R_c}{R_p} = 1.1524 + 0.3388v + 0.1286v^2 \quad (2-8)$$

Her er:

- R_c Kraterets radius [mm]
- R_p Pilens radius [mm]
- v Pilens hastighet ved trefftidspunkt [km/s]

Formlene gjelder alle for en wolframstav som treffer et mål av panserstål.

Når man kjenner kraterets radius, er det mulig å beregne den maksimale yaw-vinkelen pilen kan ha før bakparten av pilen berører kraterveggen. Denne vinkelen, som grovt sagt angir hvor skjevt pilen kan fly før penetrasjonsdybden reduseres betydelig, kalles kritisk yaw.



Figur 2-4: En pil med hastighet v og yaw α_{crit} penetrerer panser. Pilen har her den maksimale yaw-vinkel, kritisk yaw, som er slik at den bakre delen av pilen akkurat ikke berører veggen til penetrasjonskanalen.

Ved å benytte geometrien i Figur 2-4, får vi følgende uttrykk for kritisk yaw:

$$\alpha_{crit} = \arcsin \left\{ \frac{R_c/L - \frac{R_p}{L} \sqrt{1 + \left(\frac{R_p}{L}\right)^2 - \left(\frac{R_c}{L}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_p}{L}\right)^2} \right\} \quad (2-9)$$

Her er:

- α_{crit} Kritisk yaw-vinkel [°]
- L Pilens lengde [mm]
- R_p Pilens radius [mm]
- R_c Kraterets radius [mm]

Ifølge (3) er det vanlig for store L/D å tilnærme uttrykket med:

$$\alpha_{crit} = \arcsin \left(\frac{R_c - R_p}{L} \right) \quad (2-10)$$

Eksperimenter viser at penetrasjonsdybden varierer lite når yaw-vinkelen er mindre enn kritisk yaw. Penetrasjonskanalen kan imidlertid bli skjev.

For en yaw-vinkel noe høyere enn kritisk yaw, vil bakparten av pilen treffe kraterveggen med moderat lateral hastighet. Pilens hale støtes da tilbake og etterlater tydelige spor på kraterveggen. Med en slik begrenset yaw-vinkel vil ikke pilen brette, og penetrasjonsytelsen minsker bare i liten grad. Ifølge (7) vil dette være tilfellet for yaw-vinkler opp til ca 1.5 ganger kritisk yaw.

For yaw utover ca 1.5 ganger kritisk yaw, vil sammenstøtet med sideveggen bli så kraftig at pilen brekker. Noe forenklet vil den fremre delen av pilen virke med sin energi mot bunnen av kanalen og bestemme penetrasjonsdybden. Den bakre delen av pilen, som altså har truffet kraterveggen, vil klippes opp i mindre biter / debris og rikosjettere mellom kraterets

sidevegger. Energien til denne delen av pilen vil i all hovedsak bli brukt til å gjøre kanalen bredere. Siden bare deler av pilens energi brukes til å gjøre krateret dypere, vil penetrasjonsdybden minske merkbart.

Det finnes en rekke formler for penetrasjonsdybde i halv-uendelige mål som funksjon av yaw. Her gjengir vi to av disse. Ligning (2-11) er basert på en modell som er presentert i (8), og som er benyttet i (3) til å beskrive penetrasjon til en pil med $L/D = 20$ og hastighet 1.65 km/s. Kurvetilpasningen baserer seg på datapunkter der yaw varierer fra 0 til 60°:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{0.941}{1 + 0.0104 \left(\frac{\alpha}{\alpha_{crit}} \right)^2} + 0.0586 \quad (2-11)$$

Her er:

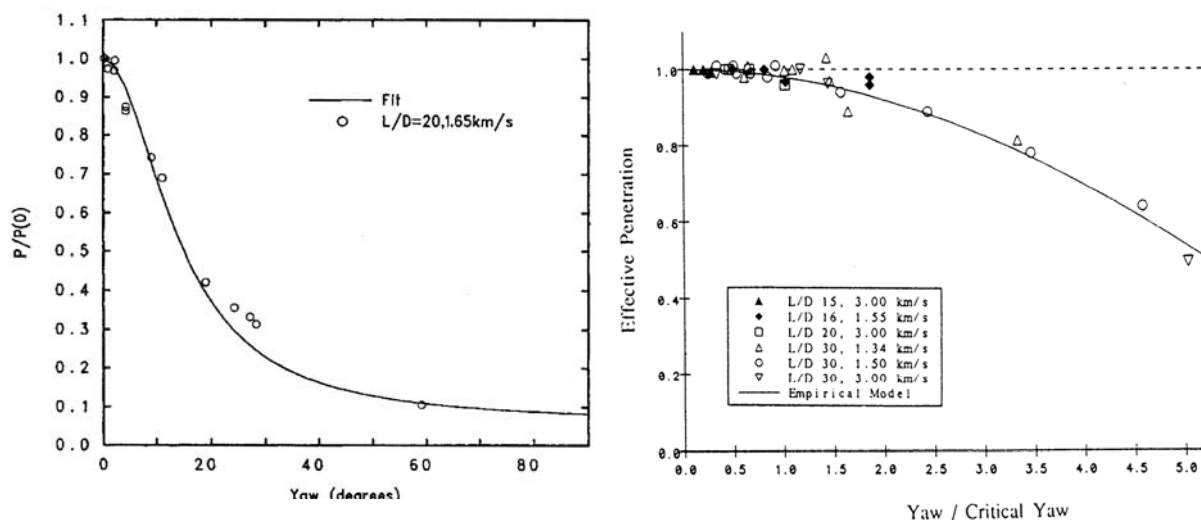
- P Penetrasjonsdybde [mm]
- P_0 Penetrasjonsdybde for pil uten yaw [mm]
- α Yaw-vinkel [°]
- α_{crit} Kritisk yaw-vinkel bestemt av at $R_c/R_p=2.0$

Ligning (2-12) er hentet fra (7) og gir et alternativt uttrykk for degradering av penetrasjonsevnen. Denne kurvetilpasningen baserer seg på data der yaw bare varierer fra 0 til 5° og der L/D -forholdet varierer fra 15 til 30:

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \cos \left(11.46 \frac{\alpha}{\alpha_{crit}} \right) \quad (2-12)$$

I denne formelen har symbolene samme betydning som i ligning (2-11). For begge gjelder det naturligvis at penetrasjonsdybden fremdeles avhenger av pilens hastighet og L/D -forhold. Denne avhengigheten kommer nå inn via parameteren α_{crit} .

I Figur 2-5 er ligningene ovenfor tegnet inn sammen med de datapunktene uttrykkene er basert på:



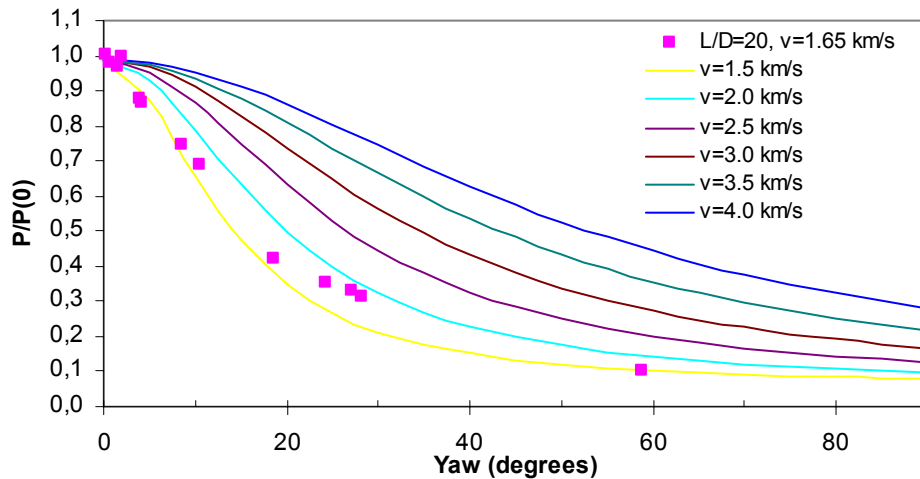
Figur 2-5: Degradering av penetrasjonsdybden som funksjon av yaw-vinkel når en pil av wolfram treffer et mål av panserstål. Venstre figur er hentet fra (3), høyre figur fra (7). For å sammenligne de to figurene, benyttes $\alpha_{crit}=1.43^\circ$.

Vi ser at de to modellene har forskjellig gyldighetsområde. Modellen fra (3) er optimalisert for å beskrive yaw for vinkler fra 0° - 90° , mens modellen fra (7) er optimalisert for vinkler fra 0° - 7° . For området der begge modellene er gyldige, predikerer (7) en sterkere nedgang i penetrasjonen enn (3). Ved å benytte modellene fra (7) og (3) finner vi at en nedgang på 20% i penetrasjonsdybden fås ved yaw-vinkler på henholdsvis 4.6° og 7.1° .

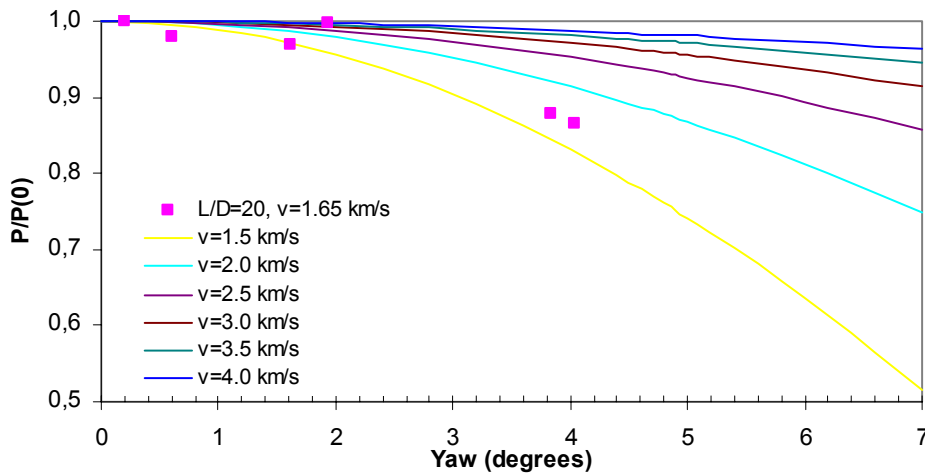
2.4.1 Pilens degradering som funksjon av pilens yaw og hastighet

En hurtig pil tåler mer yaw enn en langsom pil. Dette kan blant annet ses fra ligning (2-8), som viser hvordan krateråpningen øker med økende hastighet. For å illustrere i hvilken grad hurtige piler tåler mer yaw enn langsomme piler, har vi kombinert ligningene for kraterdiameter (2-8), kritisk yaw (2-9) og penetrasjonsdybde (2-11), (2-12). Resultatet fra disse beregningene, er gitt i Figur 2-6 og Figur 2-7.

Kurven i Figur 2-6 tar utgangspunkt i ligning (2-11), som er hentet fra (3). Vi minner om at denne ligningen kun baserer seg på eksperimentelle data for hastigheten 1.65 km/s . Figur 2-7 bygger på ligning (2-12), som er hentet fra (7). Denne ligningen baserer seg på eksperimentelle data der L/D -forhold varierer fra 15 til 30 mens hastigheten varierer fra 1.5 til 3.0 km/s .



Figur 2-6: Degradering i penetrasjonsdybde som funksjon av yaw-vinkel når en wolframpil treffer mål av panserstål. Figuren er basert på ligning (2-11) som er hentet fra (3), $L/D=20$.



Figur 2-7: Degradering i penetrasjonsdybde som funksjon av yaw-vinkel når en wolframpil treffer mål av panserstål. Figuren er basert på ligning (2-12), som er hentet fra (7), $L/D=20$.

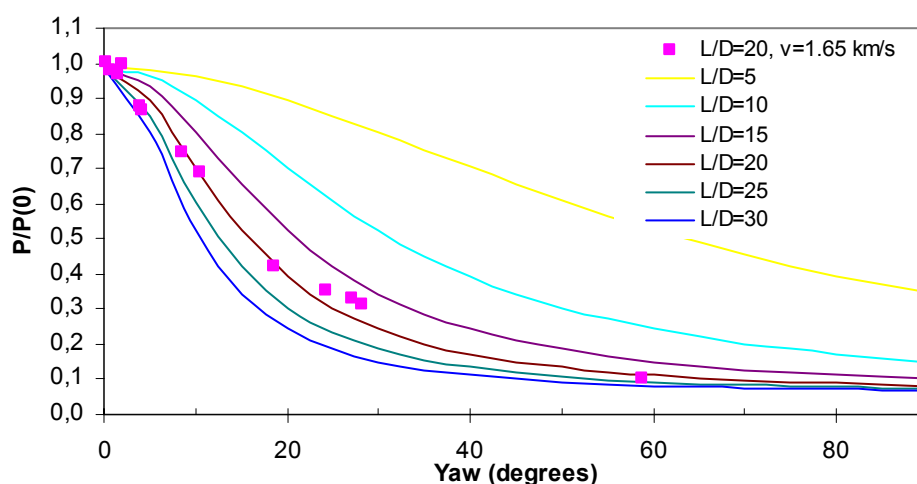
Ifølge modellen som er illustrert i Figur 2-6, vil en pil med 5° yaw og hastighet 1.5 km/s få redusert sin penetrasjon med 13% som følge av yaw-vinkelen. Med den samme yaw-vinkelen, men med en hastighet på 3.0 km/s, ville denne reduksjonen bare vært 3%. Tilsvarende reduksjon når beregningene gjøres med modellen bak Figur 2-7, blir henholdsvis 26% og 4%.

Figurene viser altså tydelig at hurtige piler tåler langt mer yaw enn langsomme.

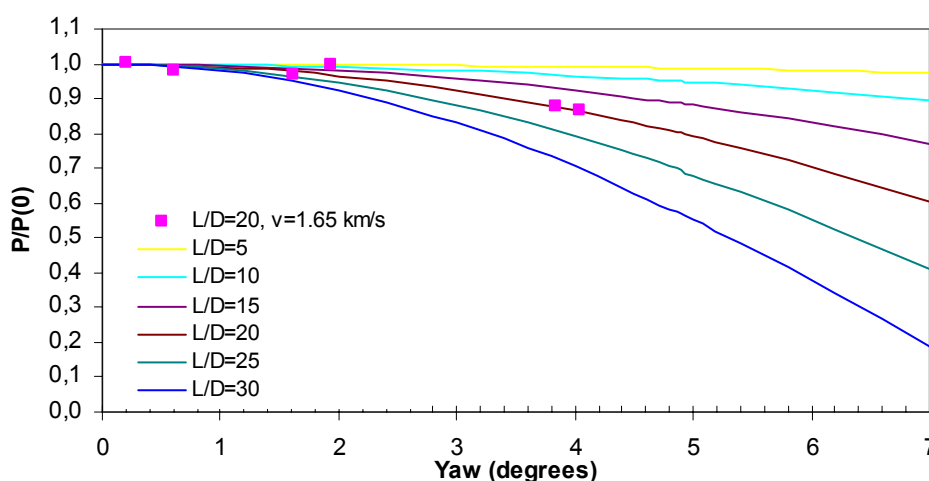
2.4.2 Pilens degradering som funksjon av pilens yaw og L/D -forholdet

Ligning (2-11) og (2-12) viser hvordan penetrasjonen reduseres med økende yaw. Siden den kritiske yaw som inngår i formlene også avhenger av L/D -forholdet, kan ligningene benyttes til å plote degradering av penetrasjon som funksjon av yaw og L/D -forhold. Dette

er gjort i Figur 2-8 og Figur 2-9 nedenfor. Plottene antar at pilens hastighet er 1.65 km/s.



Figur 2-8: Resultater for en wolframpil som treffer et halv-uendelig stålmål. Plottet gir normalisert penetrasjon som funksjon av yaw-vinkel, gitt forskjellige L/D-forhold. Pilens hastighet er 1.65 km/s. Figuren er basert på (2-11), som er hentet fra (3).



Figur 2-9: Resultater for en wolframpil som treffer et halv-uendelig stålmål. Plottet gir normalisert penetrasjon som funksjon av yaw-vinkel, gitt forskjellige L/D-forhold. Pilens hastighet er 1.65 km/s. Figuren er basert på (2-12), som er hentet fra (7).

Modellen i Figur 2-8 gir at en pil med yaw 5° og L/D=30 får en reduksjon som følge av yaw på 20%. Dersom pilen hadde hatt L/D=10, ville denne reduksjonen vært på 4%. Modellen i Figur 2-9 gir at en pil med yaw 5° og L/D=30 får en reduksjon som følge av yaw på 45%. Dersom pilen hadde hatt L/D=10, ville denne reduksjonen vært på 5%.

Figurene viser altså at korte tykke piler er mindre sårbare for yaw enn piler som er lange og tynne.

2.5 Pil som brekker

Når man ønsker å bekjempe en pil, er det ofte vanlig at man prøver å brette den. Virkningen av at pilen brette, varierer imidlertid mye:

- Dersom bruddstykkene beveger seg vekk fra hverandre, vil pilens energi fordeles over et stort område slik at penetrasjonen minsker dramatisk. I slike tilfeller får bruddstykkene dessuten yaw, noe som ytterligere minsker pilens effekt
- Dersom bruddstykkene beveger seg på linje, og bruddstykkenes yaw-vinkel er beskjeden, da vil pilens forskjellige deler virke med sin energi mot bunnen av krateret som dannes. I så fall vil penetrasjonsdybden tilnærmet bli som for en uskadet pil (Slike tilfeller kan man oppleve dersom pilen brettes opp nær pansringen, og pansringen er relativt homogen)
- Dersom en pil kommer svært flatt inn mot en pansring, vil det være en fare for at pilen preller av. Dersom pilspissen her brette, kan den ujevne bruddflaten sammen med rotasjonen fra sammenstøtet, være med på å forhindre at pilen preller av

Det at pilen brette, reduserer i de fleste tilfeller penetrasjonen dramatisk. En reduksjon på 50-70% er ikke uvanlig. For å redusere faren for at piler brette, har våpenfabrikantene lagt ned mye arbeid i å utvikle nye tungmetall-legeringer. Legeringene er i dag seigere enn tidligere, og pilene tåler stor grad av bøyning før de brette. Fra (9) har vi den historiske utviklingen til wolframlegeringers materialegenskaper:

Generasjon	1	2	3	4
År	1970	1978	1985	1995
Strekstyrke [N/mm ²]	800	1200	1450	1700
Flytgrense [N/mm ²]	≈650	1000	1400	1650
Forlengelse ved brudd (%)	1-4	≈6	≈8	≈8

Tabell 2-2: *Materialegenskaper til wolfram levert med varierende innhold av nikkel, jern, kobolt, kobber og mangan. Tallene er hentet fra (9).*

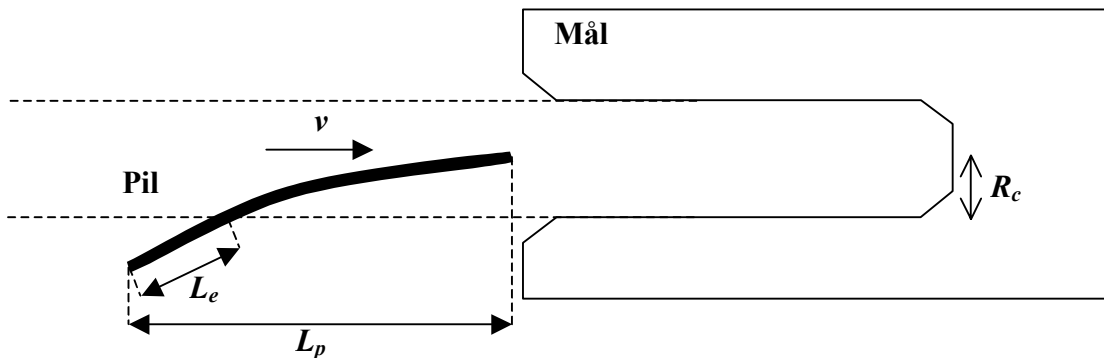
I henhold til Lanz et al (9) er en wolframpil med lengde 700 mm og radius 23 mm "state of the art" for en 120 mm-kanon i dag. Denne penetrerer ca 670 mm. Piler med L/D over 30 skal ha lett for å bøye seg og brette lett i lagdelte mål (2001). Artikkelen ser for seg at piler i fremtiden igjen kan få en kappe av et stivt materiale (for eksempel stål, komposittmateriale eller titan) rundt pilens kjerne av tungmetall. Dette skal ha en rekke fordeler. Blant annet skal dette gi en smalere penetrasjonskanal, minske sannsynligheten for at pilen brette når den treffer et lagdelt mål og gi mulighet for piler med L/D -forhold over 40. Ifølge artikkelen skal resultater vise at en noe tynnere pil med kappe får samme penetrasjon som en like lang massiv pil.

Lanz et al ser i (9) for seg en fremtidig pil som er 15% lengre, 8% raskere og med 22% bedre penetrasjon enn i dag. Dette tilsvarer en penetrasjon på rundt 820 mm RHA.

2.6 Pil som bøyes

I (10) behandles bøyning av en pil etter samme ide som benyttes for yaw. Det betyr at en reduksjon i penetrasjonsdybden følger av at pilen slites ned når den gnisser mot kraterveggen.

Kritisk yaw er ikke den mest egnede størrelsen når reduksjon i penetrasjonsdybden skyldes både yaw og bøyning. Artikkelen (10) innfører istedenfor en parameter q som angir den andelen av pilen som vil eroderes mot kraterveggen.



Figur 2-10: Parameteren $q=L_e/L_p$ kan benyttes til å gi sammenheng mellom reduksjon i penetrasjon og bøyning av pilen. R_c angir radien til det krateret som dannes når en ubøyd pil uten yaw treffer pansringen.

Størrelsen q kan defineres ved hjelp av størrelsene gitt i Figur 2-10:

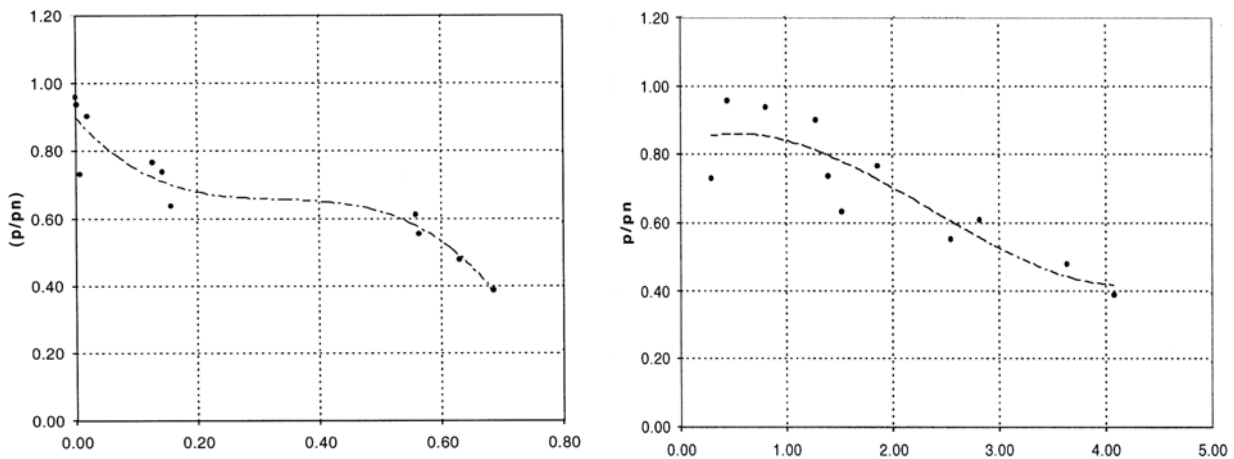
$$q = \frac{L_e}{L_p} \quad (2-13)$$

Her er:

L_e Lengden på den delen av pilen som vil vekselvirke med kraterveggen (se Figur 2-10) [mm]

L_p Pilens lengde som definert i Figur 2-10 [mm]

I (10) plottes skyteresultater for en rekke wolframpiler. Disse pilene hadde et L/D -forhold mellom 30 og 45 og en hastighet mellom 2.1 og 2.2 km/s. I Figur 2-11 gjengis måledataene sammen med to forskjellige kurvetilpasninger. Kurvetilpasningen til venstre benytter et tredjegradspolynom i q , mens kurvetilpasningen til høyre benytter et tredjegradspolynom i yaw-vinkelen α :

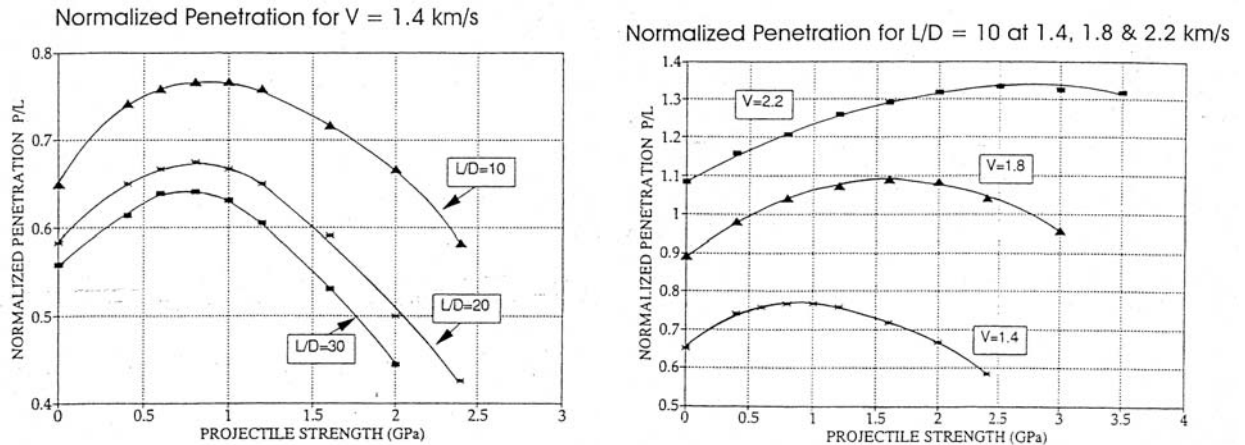


Figur 2-11: Normert penetrasjonsdybde som funksjon av parameteren q (til venstre) og som funksjon av yaw-vinkel (til høyre). Penetrasjonsdybden er normert med penetrasjonen beregnet fra Lanz Odermatt-formelen (1), mens yaw-vinkelen er normert med kritisk yaw. Parameteren q angir hvor stor andel av pilen som treffer kraterveggen. Figuren er hentet fra (10).

Skyteforsøkene som ble beskrevet i (10), inkluderte piler med både yaw og bøyning. Yaw-vinkelen lå mellom 0.3° og 4.3° , mens q -parameteren varierte mellom 0 og 0.7. For denne forsøksserien ser vi fra figurene over at kurvetilpasningen som er gitt for q , er noe bedre enn den som baserer seg på yaw-vinkelen α . Dette kan tyde på at modellantagelsen for q -parameteren er rimelig. Med andre ord at penetrasjonen minsker fordi en del av pilen vekselvirker med kraterveggen. Bøyning / yaw mindre enn krateradien vil ifølge modellen ha minimal innvirkning på penetrasjonen, mens bøyning / yaw utover krateradien kan redusere penetrasjonsdybden merkbart.

2.7 Pilens styrke

Rosenberg og Dekel (11) har numerisk studert hvilken betydning pilens strekkstyrke har for penetrasjonsdybden. I artikkelen har forfatterne variert strekkstyrken fra 0 til 3.5 GPa. Intervallet som er undersøkt, er langt større enn intervallet som er vanlig for piler av wolfram, ca 1.0-1.5 GPa. Dette er gjort for å få frem eventuelle ekstrempunkter for kurvene. I Figur 2-12 er hovedresultatet gjengitt:



Figur 2-12: Normalisert penetrasjon som funksjon av materialstyrke. Figuren er hentet fra (11).

Vi ser at den ideelle materialstyrken varierer lite med pilens L/D -forhold, men mye med pilens hastighet.

Ifølge grafen til venstre i Figur 2-12 vil en pil med hastighet 1.4 km/s og L/D -forhold 10, 20 og 30 ha maksimum ved henholdsvis 0.86, 0.79 og 0.74 GPa. En pil med materialstyrke ca 0.8 GPa er med andre ord best i alle disse tilfellene. Det er imidlertid verdt å merke seg at kurven har en relativt skarp topp for høye L/D -forhold. For en pil med hastighet 1.4 km/s og L/D lik 30 synker penetrasjonsdybden fra 0.63 til 0.55 (13%) når pilens strekkstyrke øker fra 1.0 til 1.5 GPa.

Fra grafen til høyre i Figur 2-12 ser vi at optimal styrke på pilen varierer mye med dens hastighet. Når L/D -forholdet er lik 10 og pilens hastighet er 1.4, 1.8 og 2.2 km/s, fås maksimal penetrasjon ved henholdsvis 0.9, 1.6 og 2.8 GPa. Når pilens styrke øker fra 1.0 til 1.5 GPa, minsker penetrasjonen med 5% når pilens hastighet er 1.4 km/s, mens den øker med 3% og 4% når pilens hastighet er henholdsvis 1.8 og 2.2 km/s.

I artikkelen antydes det hvorfor penetrasjonsdybden blir påvirket av pilens styrke.

Argumentet går på at den bakre delen av pilen bremses opp av den elastiske bølgen som etter anslaget forplanter seg bakover i pilen. Siden amplituden til denne bølgen avhenger av styrken til pilen, blir også penetrasjonsdybden avhengig av pilens styrke.

2.8 Målets hardhet

Målene som benyttes i skyteforsøk har sjelden den samme hardheten. Dette påvirker penetrasjonsdybden så sterkt at det er nødvendig å korrigere for dette når effekter som for eksempel L/D -effekten skal studeres. I (12) er en slik korreksjon gjort ved å anta at den normerte penetrasjonsdybden P/L avhenger av hastighet v og hardhet Y . En Taylor-utvikling gir:

$$\frac{P}{L} \left(\frac{P}{L} \right)_0 \frac{f(v, Y)}{v - v_0} \frac{f(v, Y)}{Y - Y_0} \quad (2-14)$$

Her er:

P Penetrasjonsdybde [mm]

L Pilens lengde [mm]

v Pilens hastighet [km/s]

Y Målets hardhet [BHN²]

Indeks 0 i ligning (2-14) angir verdien som rekkeutviklingen utgår fra

Ved kurvetilpassning for hastigheter i området 0.7 til 1.8 km/s kom Littlefield et al i (12) frem til følgende verdier for konstantene:

$$\left(\frac{P}{L} \right)_0 = -0.625 \quad (2-15)$$

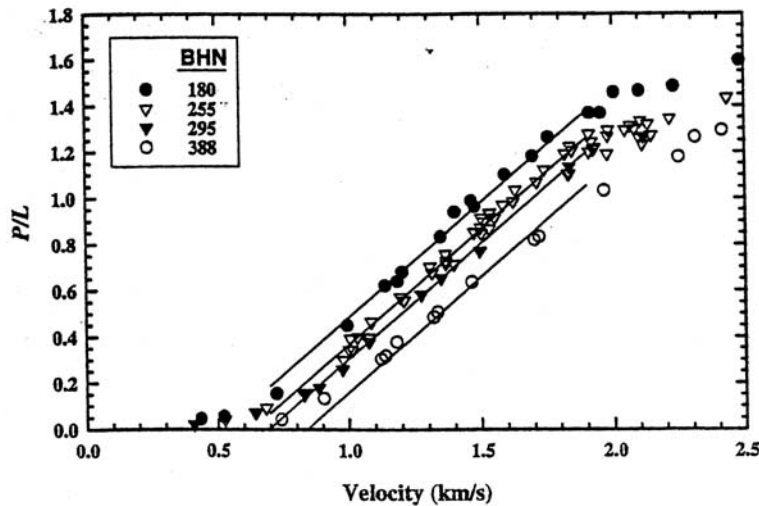
$$\frac{\partial f(v, Y)}{\partial v} = 0.993$$

$$\frac{\partial f(v, Y)}{\partial Y} = -0.00156$$

$$v_0 = 0$$

$$Y_0 = 255$$

Fra Figur 2-13 ses det at ligning (2-14) gir et godt samsvar med testresultatene:



Figur 2-13: Normert penetrasjon som funksjon av hastighet ved treff. Fire panser-kvaliteter med forskjellig hardhet er tegnet inn. Figuren er hentet fra (12).

² BHN er mål på hardhet. Hardheten måles ved å presse en herdet stålkule med diameter D mot et testobjekt med kraften F . Det lages da et hakk med diameter d i testobjektet. BHN-hardheten er da definert som:

$$BHN = 0.102 \cdot 2F / \left(\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right)$$

For hastigheten 1.5 km/s synker penetrasjonen fra ca 0.95 til 0.65, dvs ca 30%, når målets hardhet økes fra 180 til 388 BHN. Panserkvaliteten betyr altså mye for pilens penetrasjon.

2.9 Skalaforsøk

Analytiske uttrykk for penetrasjonsdybde inkluderer et varierende antall parametre som bestemmes ut fra prøveskytinger. For å spare kostnader gjøres mange prøveskytinger i liten skala, det vil si at man skyter prosjektiler som har samme form, men mindre størrelse enn pilen man ønsker å studere. Formler som fremkommer slik stemmer rimelig bra overens med resultater fra prøveskytinger i stor skala. Det er imidlertid en trend at penetrasjon skalert opp fra småskalaforsøk, blir noe mindre enn penetrasjon i storskala-forsøk.

Det er utledet at flytspenningeffekter og effekter knyttet til tøyningsens endringsrate (strain rate) medfører at penetrasjonsdybden endres med skalaen på forsøket. Til nå er imidlertid ikke hele endringen i penetrasjonsdybde blitt forklart på dette viset.

En annen fremgangsmåte for å kunne forutsi hvordan penetrasjonen endrer seg når skalaen på forsøket endres, er gitt i (4) og (13). Her deles effektene som påvirker penetrasjonen i to klasser, de som kan knyttes til pilens volum og de som kan knyttes til pilens overflate. Siden forholdet mellom overflateareal og volum endrer seg med størrelsen på pilen, kan en slik inndeling benyttes til å beskrive skalavariasjoner.

I (4) presenteres et uttrykk som inkluderer endringer i penetrasjon som funksjon av blant annet skala:

$$\frac{P}{L} = Ae^{\left[-\left(\frac{b_0}{v}\right)^c \left(1 + \frac{K}{D}\right)^{\frac{c}{2}}\right]} \quad (2-16)$$

Her er:

P	Penetrasjonsdybde [mm]
L	Pilens lengde [mm]
v	Pilens hastighet [km/s]
D	Pilens diameter [mm]
A, b_0, c, K	Parametere som bestemmes empirisk

Skalaeffektene er inkludert i form av faktoren $\left(1 + \frac{K}{D}\right)^{\frac{c}{2}}$. Når diameteren går fra uendelig til 0, endres denne faktoren fra 1 til $\left(\frac{K}{D}\right)^{\frac{c}{2}}$. En slik endring av diameteren innebærer at man går fra en situasjon der volumet er stort i forhold til overflaten (som i storskala-forsøk) og til en situasjon der volumet er lite i forhold til overflaten (som i småskala-forsøk). Faktoren varierer dermed med skalaen på forsøket.

Skalaeffektene avhenger av hvilke materialer som studeres. I (14) er det forsøkt vist at

duktiler materialer som for eksempel kobber, påvirkes lite av skalaen på skyteforsøket. For skyteforsøk med semi-sprø materialer, som for eksempel wolframlegeringer, er det derimot kjent at penetrasjonen øker når skalaen blåses opp. I artikkelen forklares denne asymmetrien med at materialene har forskjellig størrelse på den plastiske sonen foran en sprekk (ahead of crack tips).

2.10 Oppsummering av teori

Vi har nå beskrevet en rekke effekter som påvirker pilens penetrasjon. I dette avsnittet kommer vi til å gjøre enkle beregninger, som skal belyse viktigheten av disse.

Vi starter med en wolframpil som treffer en stålblokk. Vi gir pilen og målet typiske verdier for lengde, diameter, hastighet, strekkstyrke etc. Deretter endrer vi én parameter og beregner ut fra tidligere formler hvordan denne ene endringen påvirker penetrasjonen. Denne fremgangsmåten ga resultatene i Tabell 2-3:

Faktorer som påvirker penetrasjonen	Utgangsverdier for pil og mål	Ny verdi	Endring i penetrasjon	
			Endring	Beregnet vha
Pilens lengde	500 mm	700 mm	38%	(2-1)
Pilens L/D -forhold	20	40	-17%	(2-5)
Pilens hastighet	1500 m/s	1900 m/s	31%	(2-1)
Pilens yaw	0°	5°	-11%	(2-11)
		30°	-79%	(2-11)
		60°	-90%	(2-11)
Pilens styrke	1.7 Gpa	1.9 GPa	-7%	avsnitt 2.7
Målets hardhet	300 BHN	400 BHN	-20%	(2-14)

Tabell 2-3: Endring i penetrasjon når parametre varieres. Beregning gjøres med én parameter endret, mens de øvrige parameterne er satt til utgangsverdien.

Tabellen viser at alle parametrene som er angitt, kan påvirke penetrasjonen merkbart. Spesielt viktig er pilens lengde og hastighet. Reduksjonen i penetrasjon som følge av yaw, er normalt liten. Dette skyldes at piler i regelen flyr relativt stabilt. Store yaw-vinkler reduserer imidlertid penetrasjons-dybden dramatisk. Denne observasjonen har gjort at aktive beskyttelsesystemer som skal virke mot piler, ofte forsøker å forstyrre den innkommende pilen, slik at nettopp yaw-vinkelen øker.

Vi gjør oppmerksom på at parametrene i tabellen ofte påvirker hverandre. Dersom våpensystemets begrensning skulle ligge i hvor mye energi som kan tilføres pilen, da vil vi få en kobling mellom pilens lengde, L/D -forhold og dens hastighet. Når en pil designes, må man derfor optimalisere disse størrelsene i forhold til hverandre. Videre er det en forutsetning for akseptabel penetrasjonsytelse at pilen ikke bryter. Dette betyr igjen at en økning i pilens L/D -forhold vil sette krav til økt strekkstyrke for pilens materiale. Økende L/D -forhold gjør også at pilen lettere får yaw og / eller blir bøyd. For en gitt yaw-vinkel større enn null, er det dessuten slik at penetrasjonen minsker tydelig når en pil med gitt lengde gjøres slankere. Det blir derfor også viktig å se L/D -forholdet i sammenheng med de yaw-vinkler som typisk vil opptre.

3 SIMULERINGSRESULTATER FRA AUTODYN

I denne rapporten er formålet å studere hvordan piler deformeres av stillestående og bevegelige stålplater. Siden denne formen for forbekjempning kan gjøre at pilen blir svært deformert, vil formlene i kapittel 2 være vanskelige å anvende. I varierende grad vil vi faktisk befinne oss utenfor formlenes gyldighetsområde, med urimelige resultater som konsekvens. Gode svar krever da at simuleringer utføres. Følgende plan for simuleringer ble derfor lagt opp:

- Autodyns 2D-versjon skal simulere penetrasjonen i en stor (halv-uendelig) stålblock. Resultatene fra slike simuleringer er velkjente, og formler for penetrasjonsdybden, gitt i kapittel 2, skal benyttes til å kontrollere Autodyns beregninger
- Simuleringsresultatene fra punkt 1 skal reproduseres med 3D-versjonen av Autodyn
- 3D-versjon av Autodyn skal beregne penetrasjon i stålplater. Også piler med yaw og skrått anslag skal betraktes

3.1 Kort om Autodyn

Autodyn som er utviklet av Century Dynamics, er beskrevet grundig i programmets manual (15). Programmet er blant annet egnet til å simulere dynamiske situasjoner som penetrasjonsprosesser og eksplosjoner.

Når Autodyn utfører beregninger, benyttes en rekke numeriske teknikker. Hvilke teknikker som skal benyttes, bestemmes av brukeren når simuleringen programmeres inn. Under simuleringen holder Autodyn rede på hvor og for hvilke materialer de forskjellige regneteknikkene skal benyttes. For våre simuleringer med store deformasjoner har vi forsøkt tre regneteknikker, såkalt Lagrange-, Euler- og SPH³-prosessor. Når de forskjellige teknikkene gir relativt like resultater, venter vi at Autodyn ligger nær resultatet vi ville fått fra skyteforsøk.

Med Lagrange-prosessor vil en pil bestå av celler (byggeklosser). Når pilen vekselvirker med andre objekter, blir cellene deformert, og de får endret bevegelse. Cellene kan imidlertid ikke miste masse, noe som betyr at celler må slettes når pilen eroderes.

Med Euler-prosessor er området der simuleringen foregår delt inn i celler. Objekter lages så ved at man fyller utvalgte celler med materiale. I en simulering er cellene fiksert i rommet. Dette betyr at en pil beveger seg ved at pilens masse strømmer fra en celle til den neste. Euler-prosessoren unngår problemer med store celledformasjoner, men kan isteden få vanskeligheter med å ha kontroll på hvor pilens overflate befinner seg.

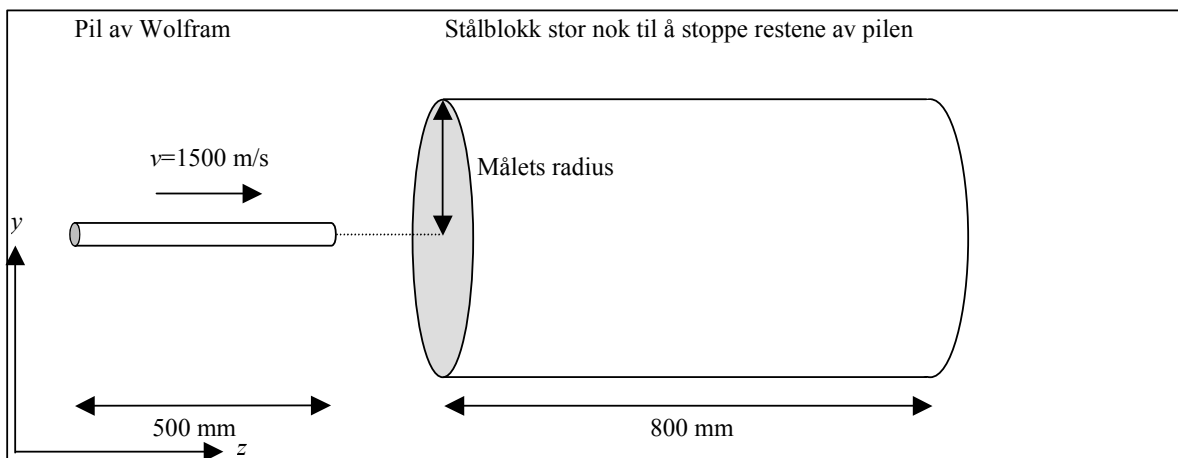
En SPH-prosessor benytter ikke et grid av celler slik som Lagrange- og Euler-prosessoren. Isteden bygges objektene opp av kuler. Prosessoren unngår Lagrange-prosessorens

³ SPH står for Smooth Particle Hydrodynamics

problemer med deformasjon av celler og Euler-prosessorens problemer med uskarpe overflater. SPH-prosessoren sliter imidlertid i enkelte situasjoner med at løsningen blir ustabil og at energibevaringsloven brytes. Kuler mangler da typisk ”naboer” eller avstanden mellom kulene er blitt ujevn. En annen begrensning med prosessoren er SPH-kulenes begrensede vekselvirkningsavstand. Når et objekt blir strukket slik at to kuler separeres med mer enn 2 diametre, blir vekselvirkningen null, og objektet sprekker. Det oppstår såkalt numerisk oppsprekking.

3.2 Penetrasjon i halv-uendelig stålblokk

Situasjonen som simuleres, er skissert i Figur 3-1:



Figur 3-1: En sylindrisk wolframpil skytes mot en sylindrisk stålblokk i ro. Pilen har radius 12.5 mm og lengde 500 mm. Stålblokken har radius 300 mm og lengde 800 mm.

Wolframpilen i denne simuleringen er 500 mm lang og har en diameter på 25 mm. Den har en hastighet mot høyre på ca 1500 m/s og treffer en stålblokk som ligger i ro. Stålblokken er med en lengde på 800 mm og en radius på 300 mm så stor at randeffekter fra side og bakkant av blokken i liten grad påvirker penetrasjonsdybden.

Når Autodyn skal utføre simuleringen, må vi velge hvordan beregningene skal utføres. For denne simuleringen har vi forsøkt de tre metodene som i Autodyn kalles Lagrange-, Euler og SPH-prosessor. Når det gjelder øvrige parametre som må settes i Autodyn, har vi gjengitt de vesentligste i Tabell 3-1:

	Pil	Mål
Beskrivelse av materialmodell:	<ul style="list-style-type: none"> • Modell for wolfram fra Autodyns Johnson-Cook bibliotek • Lineær tilstandsligning • Ingen feilkriterier • Lagrange-celler med ekstrem deformasjon fjernes ved et erosjonskriterium • Bulkmodulen 159 GPa • Skjærmodulen 81.8 GPa • Flytgrensen 0.792 GPa 	<ul style="list-style-type: none"> • Modell for 4340 Stål fra Autodyns Johnson-Cook bibliotek • Sjokk-tilstandsligning • Ingen feilkriterier • Lagrange-celler med ekstrem deformasjon fjernes ved et erosjonskriterium • Skjærmodulen 160 GPa • Flytgrensen 1.51 GPa

Tabell 3-1: Beskrivelse av materialmodellene som er valgt i simuleringen.

Siden simuleringsresultatene i stor grad påvirkes av oppløsningen som velges, gir vi i Tabell 3-2 resultater for flere valg av celledørrelse:

Prosesor	Pil		Blokk		Penetrasjonsdybde [mm]
	Oppløsning x [mm]	Oppløsning y [mm]	Oppløsning x [mm]	Oppløsning y [mm]	
Lagrange	2.5	2.5	2.5	2.5	402
	1.786	1.786	1.786	1.786	424
	1.25	1.25	1.25	1.25	438
	1	1.04	1	1	441
Euler	3	1.39	3.00	1.5	398
	1.25	1.25	1.25	1.25	406
	2.5	0.83	2.5	0.83	400
	0.83	0.83	0.83	0.83	418
SPH	2.5		2.5		322 (361)
	1.79		1.79		348
	1.39		1.39		367 (396)

Tabell 3-2: Simulert penetrasjonsdybde for en wolframpil som treffer et stålblokk. Pilen har hastighet 1500 m/s, lengde 500 mm og radius 12.5 mm. Lagrange- og Euler-cellene er rektangulære, mens SPH-cellene er sfæriske (diameter er oppgitt). For SPH-simuleringene har vi i parentes oppgitt penetrasjon når erosjonsparameteren i pilen er skrudd av.

Fra Tabell 3-2 ser vi at Lagrange-prosesoren antyder en penetrasjonsdybde på ca 440 mm, mens Euler-prosesoren gir ca 420 mm. For SPH-prosesoren økte penetrasjonsdybden når vi gjorde cellene mindre. Dessverre ble kjøringen med cellediameter 1.25 mm og 200 000 SPH-kuler for tidkrevende. Tendensen i simuleringene med SPH-prosesoren tyder imidlertid på at penetrasjonsdybden overstiger 370 mm.

3.2.1 Sammenligning med eksperimentelle verdier

Vi gir her en kort sammenstilling av eksperimentelle og simulerte resultater for situasjonen skissert i Figur 3-1:

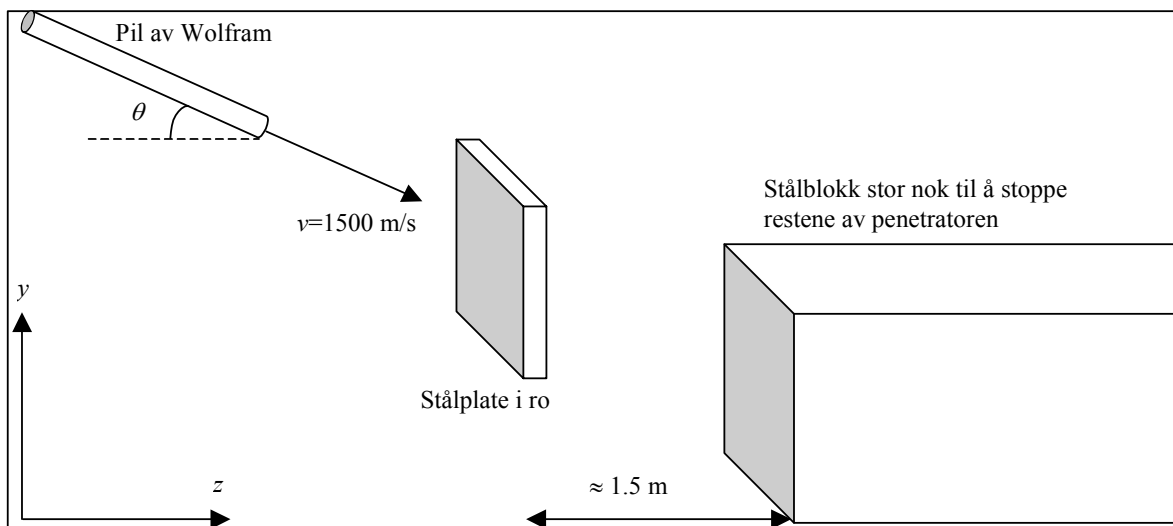
Kilde	Kommentar	L/D	Penetrasjon [mm]
Simulering Lagrange	Cellestørrelse 1x1 mm	20	441
Simulering Euler	Cellestørrelse 0.83x0.83 mm	20	418
Simulering SPH	Kulediameter 1.38 mm Finere oppløsning ville gitt noe høyere verdi	20	>367
Lundberg et al (16)	5 målepunkter Skalaforsøk fra 1:17 til 1:2	15	394
Littlefield et al (12)	3 målepunkter Som i simuleringene består målet av 4340 Stål	10	440
Hohler and Stalp. Ifølge (12) er eksperimentene beskrevet i (17)	Mer enn 100 målepunkter Penetrasjonsdybden varierer med målets varierende hardhet, som går fra 180 til 388 BHN	10	410± 80
Anderson og Morris (2)	10 målepunkter Pilens hastighet er i intervallet 1.0 til 1.5 km/s. Som i simuleringer består målet av 4340 Stål	10	447
Anderson og Morris (2)	5 målepunkter Pilens hastighet er i intervallet 1.1 til 1.5 km/s. Som i simuleringer består målet av 4340 Stål	15	407
Woolsey et al (Beskrevet i (2))	Pilens hastighet er 1.5 km/s	10	430±10
Sorensen et al (Beskrevet i (2))	$\frac{P}{L} = 0.275 + 0.596V - 0.940\sqrt{1.304 - 1.259V + 0.315V^2}$	>15	419
Subramanian et al (4)	$\frac{P}{L} = 1.770e^{-(1.357/V)^{2.497}}$ Ligningen baserer seg på kurvetilpasning av data, der pilens hastighet er mindre enn 4 km/s. Stålets hardhet var ca 270 BHN	20	406
Ligning (2-5)	Ligningen er hentet fra Anderson et al (5) / Walker et al (3) og baserer seg på kurvetilpasning av data, der $L/D \leq 30$ og $1.2 \text{ km/s} < v < 1.8 \text{ km/s}$. Målets hardhet ligger på ca 270 BHN	20	388
Ligning (2-14)	Ligningen er hentet fra Littlefield et al (12) og baserer seg på kurvetilpasning av data, der $L/D=10$ og $v < 4 \text{ km/s}$. Stålets hardhet lå i intervallet fra 180 til 388 BHN. Oppgir her penetrasjon for 270 BHN	10	421

Tabell 3-3: Sammenligning av simulerte og eksperimentelle resultater.

Fra tabellen ser vi at simuleringene ga verdier mellom 370 og 440 mm, skyteforsøk ga verdier mellom 330 og 490 mm, mens formelverket ga verdier mellom 390 og 420 mm. Det er en relativt stor variasjon mellom resultatene, og dette skyldes hovedsakelig variasjon i målets hardhet og pilens L/D -forhold. Simuleringsresultatene ligger imidlertid innenfor intervallet til skyteforsøkene og overlapper intervallet som fås fra formelverket.

3.3 Skrått anslag mot stillestående plate

Situasjonen som simuleres, er skissert i Figur 3-2:



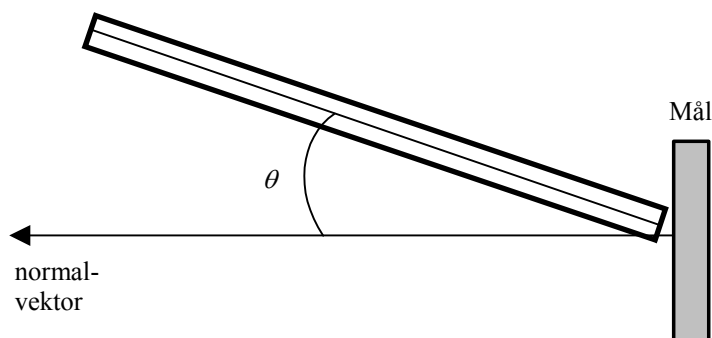
Figur 3-2: En pil av wolfram kommer skrått inn mot en tynn stålplate og perforerer denne. Restene av pilen treffer i utvalgte simuleringer en stor stålblokk.

Som tidligere benyttes en sylindrisk pil av wolfram med hastighet 1500 m/s. Pilen har radius 12.5 mm og lengde 500 mm. Pilen treffer stålplaten på figuren med en vinkel θ , som i simuleringene har hatt verdiene 0° , 10° , 30° , 50° og 70° når stålplaten er 10 mm tykk og 0° og 70° når stålplaten er 25 mm tykk. Stålplaten er i alle tilfeller 200 mm høy og 300 mm bred. Pilen deformeres av stålplaten. For to utvalgte simuleringer fortsetter restene av pilen inn i en stor stålblokk, slik at gjenværende penetrasjonsevne bestemmes. Stålblokken har dimensjoner 105x399x598.5 mm når innfallsvinkelen er 0° og 105x598.5x399 mm når innfallsvinkelen er 70° . Med andre ord er stålblokken tykkest i den dimensjonen der pilens hastighet er størst. Materialmodellene er de samme som i avsnitt 3.2.

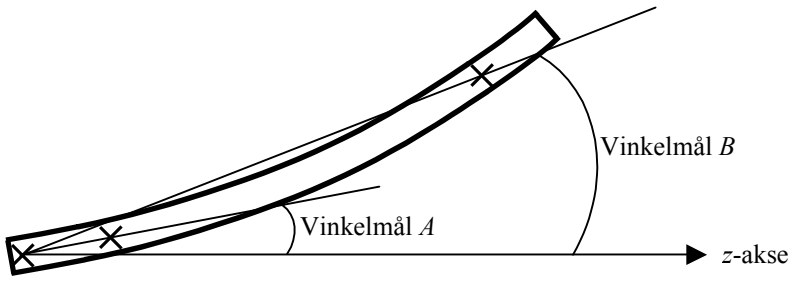
3.3.1 Resultater

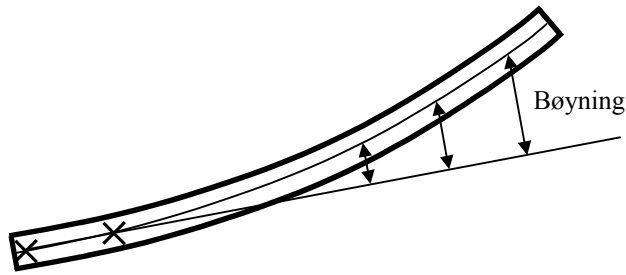
En rekke data er registrert i forbindelse med simuleringene, og et utvalg er gjengitt i Tabell 3-4. Siden pilen ble bøyd i simuleringene er det ikke intuitivt gitt hva som skal menes med pilens vinkel og vinkelhastighet. Vi velger derfor å presisere hva som menes med de størrelsene vi angir i tabellen:

Innfallsvinkel:



Figur 3-3: Definisjon av pilens innfallsvinkel θ (Dette betyr at vi måler innfallsvinkelen i NATO-grader).

Reduksjon i pilens lengde: [mm]	Reduksjonen i pilens lengde ble funnet ved å lese av posisjonen til SPH-kulene i slutttilstanden
V_y [m/s]	Massesenterets hastighet i y-retning (y-aksens retning er definert i Figur 3-2)
V_z [m/s]	Massesenterets hastighet i z-retning (z-aksens retning er definert i Figur 3-2)
Hastighet [m/s]	Massesenterets hastighet
Massesenters fartsretning [°]	Størrelsen er definert som $\arctan V_y/V_z$
Intervall for pilens vinkel [°]	Pilens vinkel måles i forhold til en vektor e_z langs z-aksen. For simuleringene registrerte vi vinklene mellom e_z og 44 linjestykker som startet og sluttet på pilens akse. Startpunktet befant seg 10 mm fra pilens bakkant, mens endepunktene fordelte seg med 10 mm avstand fremover på pilen. Den største og minste vinkelen som ble registrert for tider mellom 0 og 10 ms, gir intervallet for pilens vinkel
Pilens vinkel [°]	<p>Pilens vinkel måles i forhold til en vektor e_z langs z-aksen.</p> <p>Vinkelmål <i>A</i> angir vinkelen mellom e_z og linjen mellom de to punktene på pilens akse som er 10 og 60 mm fra pilens bakkant.</p> <p>Vinkelmål <i>B</i> angir vinkelen mellom e_z og linjen mellom de to punktene på pilens akse som er 10 og 450 mm fra pilens bakkant.</p> <p>Dersom de to vinkelmålene er relativt like, er pilen i liten grad bøydd</p>
	
	<i>Figur 3-4: Definisjon av pilens vinkel.</i>
Vinkelhastighet [rad/s]	Angir endring av vinkelmål <i>B</i> pr tid
Bøyning [mm]	Bøyning benytter linjen mellom de to punktene på pilens akse som er henholdsvis 10 og 60 mm fra pilens bakkant. Denne linjen forlenges, og vi finner avstanden fra denne linjen og til ca 45 punkter på pilens akse. Bøyning har vi da definert som den maksimale av disse avstandene (Punktene som er valgt, ligger fra 10 til 450 mm fra pilens bakkant)



Figur 3-5: Definisjon av bøyning.

De mest sentrale resultatene fra kjøringene følger i Tabell 3-4:

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Masse [kg]	Reduksjon i pilens lengde [mm]	Vy [m/s]		Vz [m/s]		Hastighet [m/s]		Massesenters fartsretning [°]		Pilens vinkel [°]		Intervall for pilens vinkel [°]	Vinkelhastighet [rad/s]	Bøyning [mm]
				t=0 ms	t=10 ms	t=0 ms	t=10 ms	t=0 ms	t=10 ms	t=0 ms	t=10 ms	A	B			
10	0	1.89	13	0	0	1500	1486	1500	1486	0	0.0	0.0	0.0	-0.1/0.1	0	<7.0
	10	1.89	14	260	258	1477	1462	1500	1485	10	10	10.4	10.2	9.6/11.1	0.2	<9.2
	30	1.89	15	750	742	1299	1285	1500	1484	30	30.0	29.4	30.0	28.5/30.9	0.0	< 2.5
	50	1.87	22	1149	1133	964	952	1500	1480	50	50.0	51.2	50.3	48.3/51.5	0.7	< 0.9
	70	1.78	50 ¹	1410	1378	513	508	1500	1469	70	69.8	70.4	69.1	67.1/71.6	2.0	< 0.5
25	0	1.85	33	0	0	1500	1474	1500	1474	0	0	0.1	0.2	-0.2/0.2	-0.2	< 7.1
	70	1.55	114 ¹	1410	1352	513	508	1500	1444	70	69.4	68.5	64.0	61.5/70.9	-0.9	< 8.8

Tabell 3-4: Sammenstilling av sentrale data for en pil av wolfram som perforerer en 10 eller 25 mm tykk stålplate.

¹ Med 70° innfallsvinkel kan pilen ha vekselvirket med et grovere grid enn i de øvrige kjøringene. Dette kan bety at reduksjonen vi oppgir her, er noe for høy

Vi er interessert i hvordan forbekjempning med stålplater påvirker pilens videre penetrasjon. I de følgende kapitlene kommer vi til å diskutere hvordan blant annet endring i pilens hastighet, endring i pilens yaw og eventuelle deformasjoner påvirker senere penetrasjonsytelse. Vi kommer til å anta at de forskjellige effektene påvirker penetrasjonsytelsen uavhengig av hverandre.

3.3.2 Pilens hastighet

Det at en pil perforerer en stålplate gjør at hastigheten til pilen reduseres. I dette avsnittet kommer vi til å oversette denne reduksjonen i hastighet til en reduksjon i penetrasjonsdybde.

Ved å anta at hastighetsreduksjon er den eneste konsekvensen som følger av perforeringen, kan for eksempel en forenklet versjon av ligning (2-4) hentet fra (4) benyttes:

$$\frac{P}{L} = 1.770e^{-(1.357/v)^{2.497}} \quad (3-1)$$

Her er:

- P Penetrasjonsdybde i mm
- L Pilens lengde i mm
- v Pilens hastighet i km/s

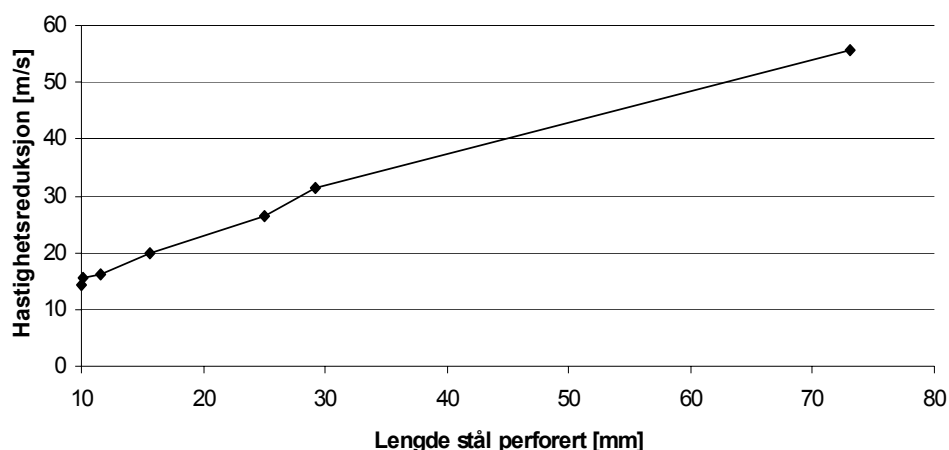
I Tabell 3-5 er ligningen benyttet til å finne forventet penetrasjonsreduksjon for de syv tilfellene som ble simulert:

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Starthastighet [m/s]	Slutthastighet [m/s]	Reduksjon i penetrasjonsdybde ifølge ligning (3-1) [%]
10 mm	0	1500	1486	2
	10	1500	1485	2
	30	1500	1484	2
	50	1500	1480	3
	70	1500	1469	4
25 mm	0	1500	1474	3
	70	1500	1444	7

Tabell 3-5: Reduksjon i penetrasjonen til en wolfram-pil når hastigheten reduseres.

Vi ser at for en plate på 10 mm vil pilens hastighetsreduksjon alene bidra med mindre enn 4% reduksjon i penetrasjonen. For en plate på 25 mm kan den samme reduksjonen komme opp i 7%.

Hvilken hastighetsreduksjon pilen får, avhenger hovedsakelig av mengden stål pilen må perforere. Dette ser man dersom man plottet hastighetsreduksjonen som funksjon av veilengden gjennom stålplaten. For simuleringene gitt i Tabell 3-5 er denne sammenhengen plottet i Figur 3-6:



Figur 3-6: En wolframpil med hastighet 1500 m/s perforerer en 10 mm tykk 4340-stålplate. Figuren gir sammenhengen mellom hvor lang vei pilen har gjennom stålplaten og reduksjonen i hastighet som følger.

Vi ser at sammenhengen mellom hastighetsreduksjon og lengde stål perforert er tilnærmet lineær. Ved å bruke minste kvadraters metode på dataene fra forsøket med 10 mm tykk

stålplate, uttrykket $l = t/\cos\theta$ for veilengden gjennom stålplaten (platetykkelse t og innfallsvinkel θ), samt ligning (3-1), får vi følgende uttrykk for reduksjonen i penetrasjonsdybden:

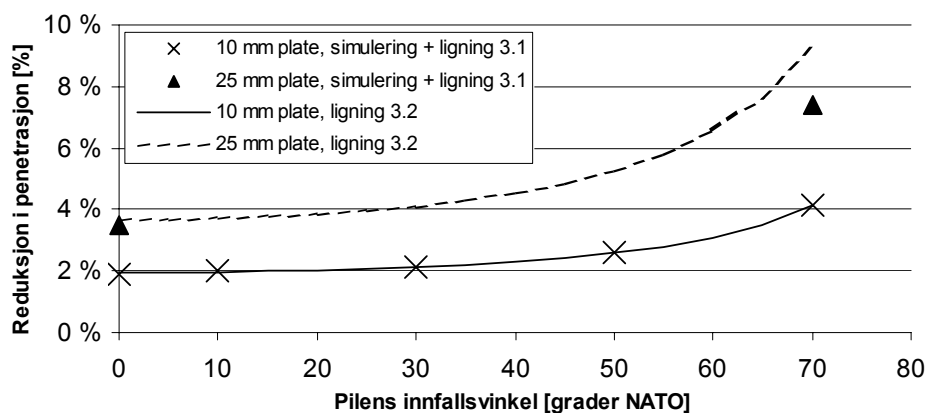
$$R = 1 - e^{\left(\frac{a}{v_0}\right)^b - \left(\frac{a}{v_f}\right)^b}, \quad v_f = v_0 - \frac{ct}{\cos\theta} - d \quad (3-2)$$

Symbolene står for:

$a=1.357$	Konstanter
$b=2.497$	
$c=0.000858$	
$d=0.006378$	
R	Reduksjon i penetrasjon [%]
v_0	Starthastighet, som her er lik 1.5 km/s
t	Tykkelse på stålplate [mm]
θ	Pilens innfallsvinkel mot stålplaten [°]

Vi gjør oppmerksom på at hastighetsintervallet som er undersøkt, er svært lite og at uttrykket derfor ikke må brukes generelt.

Overensstemmelse med verdiene i Tabell 3-5 er gitt av Figur 3-7:



Figur 3-7: Reduksjon i penetrasjon som funksjon av pilens innfallsvinkel. Pilen treffer en 10 mm eller en 25 mm tykk stålplate. Det er i figuren antatt at det kun er hastighetsreduksjonen som reduserer penetrasjonsdybden.

Formelen for reduksjon i penetrasjonsdybde er oppnådd ved kurvetilpasning til dataene for den 10 mm tykke stålplaten. Uttrykket for 25 mm platen fulgte av antagelsen om at pilens hastighet minsket lineært med den lengde stål som ble perforert.

3.3.3 Pilens fartsretning

Fra Tabell 3-4 ser vi at fartsretningen til pilens massesenter maksimalt endrer seg med 0.6° . Når pilens retning gjennom en hovedpansring endrer seg fra 70° til 69.4° , innebærer dette at

pilen får en 3% kortere vei gjennom stålblokken den skal perforere. Stålplaten er altså her med på å rette opp pilen, og pilens penetrasjonsdybde vil faktisk *øke*. For den 10 mm tykke stålplaten fant vi at pilens fartsretning endret seg med mindre enn 0.1° når innfallsvinkelen var under 50° . For tynne plater ser det derfor ut som om denne effekten ofte kan neglisjeres.

3.3.4 Pilens vinkelhastighet

Vinkelhastigheten er for alle simuleringene så liten at betydningen av denne er neglisjerbar. I våre simuleringer har vi ikke registrert en vinkelhastighet på mer enn 2 rad/s. Siden pilen beveger seg 1 meter på typisk 0.7 ms, så tilsvarer 2 rad/s en vinkelendring på under 0.1° for hver meter pilen tilbakelegger.

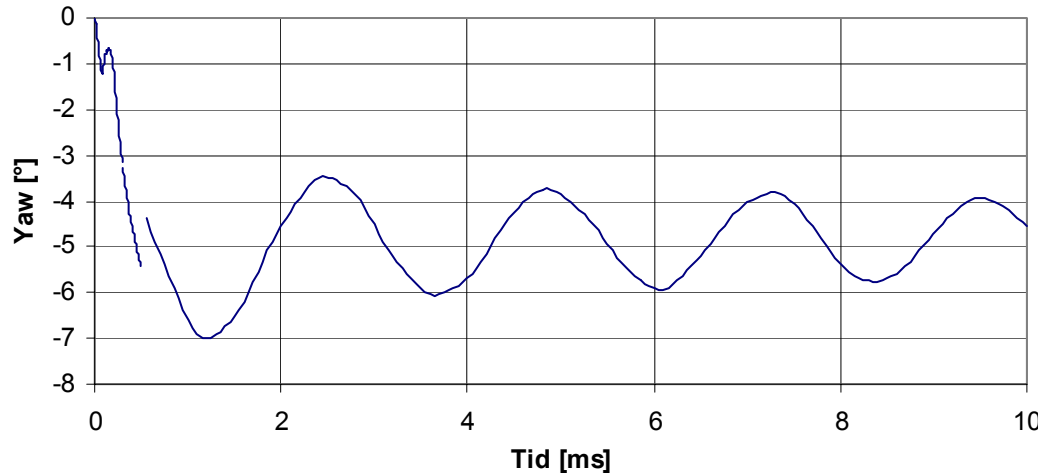
3.3.5 Pilens yaw

Yaw angir vinkelen mellom massesenterets fartsretning og retningen til pilen. Størrelsen angir med andre ord hvor skjevt pilen flyr. For de syv simuleringene skissert i Figur 3-2 fikk pilen en yaw som oppgitt i Tabell 3-6 under:

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Yaw [°] $t=0$ ms	Variasjonsområde for yaw i tiden $t \in [0.6, 10]$ ms	Yaw [°] $t=10$ ms
10 mm	0	0.0	[-0.06, 0.04]	0.02
	10	0.0	[-0.03, 0.15]	0.15
	30	0.0	[-0.16, 0.30]	-0.01
	50	0.0	[-0.09, 0.43]	0.30
	70	0.0	[-2.65, 0.11]	-0.66
25 mm	0	0.0	[-0.17, -0.05]	-0.16
	70	0.0	[-7.01, -3.47]	-4.56

Tabell 3-6: Yaw registrert i syv forskjellige simuleringer, der platetykkelse og innfallsvinkel varieres. For den bøyde pilen beregnes yaw fra massesenterets fartsretning samt "vinkelmål B" definert i avsnitt 3.3.1.

I tabellen har vi angitt yaw-vinkelen ved simuleringenes start ($t=0$ ms) og slutt ($t=10$ ms). Etter at pilen hadde perforert stålplaten ($t=0.6$ ms) viste simuleringene at pilens yaw-vinkel varierte med tiden. Variasjonene var periodiske og lå innenfor det intervallet vi har oppgitt i tabellen. Hvordan yaw-vinkelen kan variere med tiden er illustrert i Figur 3-8:



Figur 3-8: Pilens yaw-vinkel som funksjon av tiden. I denne simuleringen treffer wolframpilen en 25 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 70°. Etter at stålplaten er perforert flyr pilen fritt. Simuleringen avsluttes ved $t = 10$ ms.

Vi ser fra figuren at pilens yaw endres når den perforerer stålplaten. Etter dette får pilen en oscillerende bevegelse, der pilens yaw varierer mellom ca 4° og 6°. Perioden på oscillasjonen er her ca 2.4 ms.

Ved hjelp av ligning (2-11) fra avsnitt 2.4 kan vi tallfeste hvordan penetrasjonsdybden endres, når yaw-vinkelen endres. Siden ligningen kun er gyldig når det er pilens yaw som varierer (andre parametre konstant), må vi som tidligere anta at yaw påvirker pilens penetrasjon uavhengig av alle andre endringer i pilens bevegelse. Resultatet fra beregningene er gitt i Tabell 3-7 (I beregningene er kritisk yaw satt til 1.433°):

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Reduksjon i penetrasjonsdybde [%]		
		$t=0$ ms	Intervall for reduksjon når yaw varierer i tiden $t \in [0.6, 10]$ ms	$t=10$ ms
10 mm	0	0	0	0
	10	0	0	0
	30	0	0	0
	50	0	0	0
	70	0	[0, 3]	0
25 mm	0	0	0	0
	70	0	[5, 19]	9

Tabell 3-7: Reduksjon i penetrasjonsdybde som følge av yaw. Reduksjonen måles i forhold til en pil uten yaw. Det gjøres oppmerksom på at pilen i enkelte av simuleringene er bøyd, og at dette gjør tallene usikre.

I Tabell 3-7 har vi funnet reduksjonen i penetrasjonsdybde for yaw-vinkelen ved simuleringenes start ($t=0$ ms), ved simuleringens slutt ($t=10$ ms) og for perioden som går fra $t=0.6$ ms til $t=10.0$ ms. I den sistnevnte perioden varierte pilens yaw-vinkel. Variasjonsområdet, som ble angitt i Tabell 3-6, er i tabellen over oversatt til et intervall for reduksjon i penetrasjonsdybde.

Fra Tabell 3-6 og Tabell 3-7 ser vi at en 10 mm tykk stålplate kun i svært liten grad gir pilen

yaw, og at dette kun i liten grad påvirker pilens videre penetrasjon. For simuleringenes slutttilstand var pilens yaw faktisk tilnærmet null. Den største endringen i yaw-vinkel, som vi registrerte i løpet av hele simuleringen, ville maksimalt ha gitt en 3% reduksjon i penetrasjonen.

En 25 mm tykk plate betyr med vårt forsøksoppsett at pilen får merkbar yaw for store innfallsvinkler. Fra Tabell 3-7 ser vi at penetrasjonen minsker med mellom 5% og 19% for en innfallsvinkel på 70°. For å tallfeste den minste vinkelen som gir vesentlig svekket penetrasjonsytelse, må flere simuleringer utføres.

3.3.6 Erosjon av pilen

Ifølge Tabell 3-4 blir pilen 15-20 mm kortere av å perforere en 10 mm stålplate. Dette gjelder for innfallsvinkler opp til 50°. Over dette øker slitasjen av pilen klart og er ved en innfallsvinkel på 70° blitt 50 mm. Dersom vi ser bort fra at pilspissen endrer form og samtidig antar uavhengighet mellom effekter som påvirker penetrasjonen, får vi fra ligning (2-3) at en reduksjon på 15-20 mm i pilens lengde vil bety en reduksjon på 3-4% i penetrasjonsdybden. En reduksjon på 50 mm i pilens lengde vil tilsvarende bety 10% mindre penetrasjonsdybde.

For en 25 mm tykk stålplate, ble pilen 33 mm kortere ved en innfallsvinkel på 0°. Med de samme antagelsene som over, tilsvarer dette en minkning i penetrasjonsdybden på 7%.

3.3.7 Bøyning av pilen

Etter at stålplaten er perforert, veksler pilen mellom å være ubøyd og bøyd. Siden den maksimale bøyningen ifølge Tabell 3-4 er på 10 mm, og krateråpningen i dette tilfellet vil ha en radius på ca 25 mm, vil ikke bøyningen alene gjøre at pilen slites mot kraterets vegger. Bøyning vil for vårt eksempel altså ikke i stor grad påvirke penetrasjonen.

3.3.8 Total reduksjon i penetrasjonsdybde

Vi ønsker å uttale oss om hvordan penetrasjonsytelsen påvirkes dersom pilen, før en hovedpansring, treffes av en stålplate. Dessverre er det svært tidkrevende å simulere hvordan restene av pilen penetrerer hovedpansring / stålblokk og vi har derfor begrenset oss til to slike simuleringer. Resultatene der platetykkelsen var 10 mm og innfallsvinklene 0° og 70°, er gitt i Tabell 3-8:

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Starthastighet [m/s]	Hastighet etter plate [m/s]	Innfallsvinkel etter plate [°]	Penetrasjon [mm]	Reduksjon i penetrasjonsdybde [%]
Ingen stålplate	0	1500			408	Referansesim.
	70	1500			351*	Referansesim.
10 mm stålplate	0	1500	1487	0	388	5
	70	1500	1469	69.8	287*	18*

Tabell 3-8: En pil penetrerer først en 10 mm tykk stålplate, deretter en stor stålblokk. Alle simuleringene er utført med Autodyn's SPH-prosessor.
*) Avlesninger for skjev penetrasjonskanal er usikre.

Med en innfallsvinkel på 0° reduseres penetrasjonsdybden i en stor stålblokk med 5 % dersom pilen først må perforere en 10 mm stålplate. Med en innfallsvinkel på 70° ga våre simuleringer at innfallsvinkelen alene ga en reduksjon i penetrasjonsdybden på ca 15%. Dersom pilen dessuten måtte perforere en stålplate, ble reduksjonen totalt 30%.

Vi har ikke tilsvarende tall for hvor gunstig forbekjempning med 25 mm plater vil være. Vi så imidlertid at pilen ble vesentlig mer deformert med disse tykkere platene.

I tidligere avsnitt har vi forsøkt å klargjøre hvilke effekter som er mest sentrale for senere penetrasjonsytelse. Vi skal nå summere bidragene fra disse og antyde hvilken reduksjon som kan ventes i penetrasjonen av hovedpansringen når pilen forbekjemmes med stillestående plate. Estimaten for effektivitetsnedsettelse er hentet fra de tidligere avsnittene og er derfor basert på antagelsen om at for eksempel endring i hastighet og yaw påvirker penetrasjonsytelsen uavhengig av hverandre:

Platetykkelse [mm]	Innfallsvinkel [°]	Reduksjon i penetrasjon [%]					Sum	Simulering
		Endring i pilens hastighet	Endring i pilens fartsretning	Endring i yaw	Erosjon av pilen	Bøyning av pilen		
10	0	2	0	0	3	≈0	5	5
	10	2	0	0	3	≈0	5	
	30	2	0	0	3	≈0	5	
	50	3	≈0	≈0	4	≈0	7	
	70	4	-1	0-3	10	≈0	13-16	18*
25	0	3	0	0	7	≈0	10	
	70	7	-3	5-19	23	≈0	32-46	

Tabell 3-9: Prosentvis reduksjon av penetrasjonsytelse for de effektene notatet har vurdert. Bidragene er antatt små og uavhengige, slik at de kan summeres.

*) Avlesninger for skjev penetrasjonskanal er usikre

Både yaw og bøyning reduserer penetrasjonsytelsen ved at pilen slites mot penetrasjonskanalens sidevegger, og disse to effektene vil ikke være uavhengige av hverandre. Siden bøyningen er liten, har vi i tabellen antatt at pilen ikke vil berøre sideveggen på penetrasjonskanalen. På grunn av yaw er det imidlertid ikke sikkert at denne antagelsen holder, og tallene som er gitt for bøyning i Tabell 3-9 er derfor svært usikre.

Tabellen antyder at en fastmontert stålplate, slik som i våre simuleringer, hovedsakelig

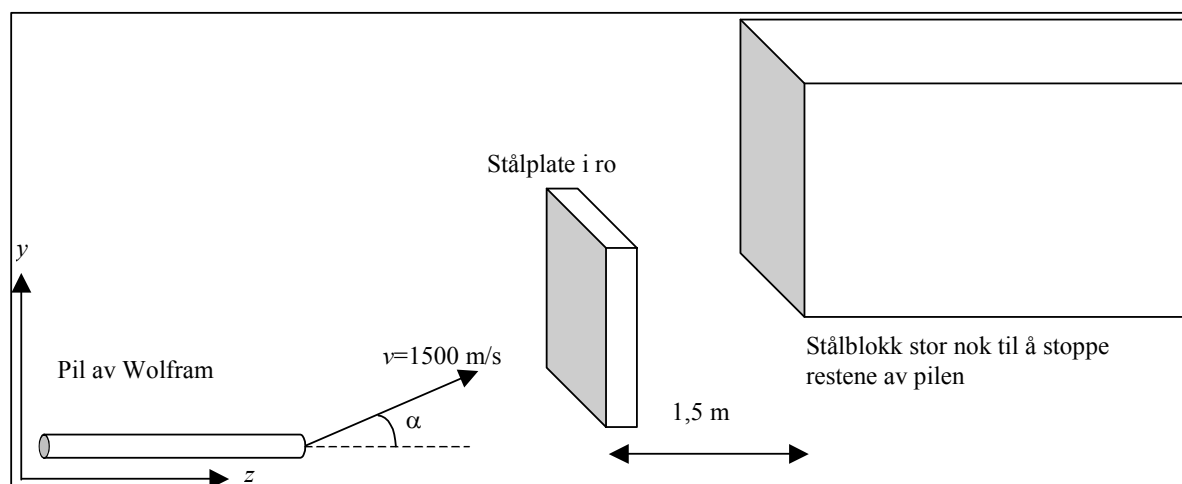


reduserer pilens penetrasjon ved at pilen bremses og eroderes. Først når innfallsvinkelen blir svært stor, får yaw og bøyning betydning for videre penetrasjon.

Simuleringene tyder videre på at en 10 mm stålplate har liten effekt mot pilene vi har simulert. En 25 mm stålplate har derimot god effekt når innfallsvinkelen blir stor nok. Ifølge tabellen vil stålplaten redusere penetrasjonsdybden med ca 10% når pilen treffer normalt på pansringen og med godt over 30% når innfallsvinkelen øker til 70°.

3.4 Pil med yaw mot stillestående plate

Situasjonen som simuleres er skissert i Figur 3-9:



Figur 3-9: Skisse over simuleringen der en pil med yaw skytes mot en stillestående stålplate.

Som tidligere benyttes en sylindrisk pil av wolfram med radius 12.5 mm, lengde 500 mm og hastighet 1500 m/s. Pilen treffer først en 10 eller 25 mm tykk stålplate som har høyde 200 og bredde 300 mm. Etter at pilen har perforert denne stillestående stålplaten, lar vi den i 3 simuleringer penetrere videre inn i en stillestående stålblock med dimensjoner 105x399x598.5 mm.

I alle simuleringene som vil bli beskrevet, har pilen en innfallsvinkel på 0°. Yaw-vinkelen, kalt α på figuren, varieres. For den 10 mm tykke stålplaten simuleres yaw-vinkler på 0°, 1°, 3°, 5° og 10°, mens for stålplaten på 25 mm simuleres yaw-vinkler på 0° og 10°.

Materialmodellene er som for tidligere simuleringer og er gitt i Tabell 3-1.

3.4.1 Resultater

En rekke data er registrert i forbindelse med simuleringene, og vi gjengir her de mest sentrale. Forklaring på kolonneoverskriftene finnes i avsnitt 3.3.1.

Platetykkelse [mm]	Yaw-vinkel [°]	Masse [kg]	Reduksjon i pilens lengde [mm]	Vy [m/s]		Vz [m/s]		Hastighet [m/s]		Massesenters fartsretning [°]		Pilens vinkel [°]		Intervall for pilens vinkel [°]	Vinkelhastighet [rad/s]	Bøyning [mm]
				≠0 ms	≠10 ms	≠0 ms	≠10 ms	≠0 ms	≠10 ms	≠0 ms	≠10 ms	A	B			
10	0	1.89	13	0	-0.2	1500	1486	1500	1486	0	0.0	0	0	-0.1/0.1	0	< 0.70
	1	1.89	13	26	24.8	1500	1486	1500	1486	1	1.0	-0.1	0.3	-0.7/0.9	0.2	< 8.4
	3	1.91	11	79	53.8	1498	1482	1500	1483	3	2.1	-0.2	0.8	-2.3/1.9	0.2	< 5.5
	5	1.91	12	131	99.2	1494	1476	1500	1480	5	3.8	0.4	0.2	-2.3/1.9	0.4	< 8.2
	10	1.91	11	260	215	1477	1457	1500	1473	10	8.4	-0.8	-0.9	-2.9/0.7	0.4	< 8.9
25	0	1.85	33	0	0	1500	1474	1500	1474	0	0	0.1	0.2	-0.2/0.2	0.2	< 7.1
	10*	1.83	-	260	151	1477	1429	1500	1437	10	6.0					
		0.22			146		1401		1408	10	6.0	-5.2	-6.1	-7.7/0.8	≈3	< 0.5
		1.60			152		1433		1441	10	6.0	-3.5	-3.3	-5.7/0.3	-1.4	< 26

Tabell 3-10: Sammenstilling av sentrale data etter at en pil med yaw har perforert en stålplate på enten 10 eller 25 mm.

* Pilen brakk i to. De to delene hadde lengde 61 mm og 409 mm

Fra resultatene gitt i tabellen over ser vi hvordan en pil med hastighet 1500 m/s påvirkes av å perforere en 10 eller 25 mm tykk plate.

3.4.2 Pilens hastighet

Pilens hastighet minsker når den perforerer stålplaten. I dette avsnittet ønsker vi å oversette hastighetsreduksjonen til reduksjon i restpenetrasjon. Med samme fremgangsmåte som vi benyttet i avsnitt 3.3.2, får vi resultatene gitt i Tabell 3-11:

Platetykkelse [mm]	Yaw-vinkel [°]	Starthastighet [m/s]	Slutthastighet [m/s]	Reduksjon i penetrasjonsdybde ifølge (3-1) [%]
10 mm	0	1500	1486	2
	1	1500	1486	2
	3	1500	1483	2
	5	1500	1480	3
	10	1500	1473	4
25 mm	0	1500	1474	3
	10	1500	1437	8

Tabell 3-11: Reduksjon i penetrasjon til en pil av wolfram når hastigheten reduseres.

Vi ser at hastigheten til pilen reduseres ettersom pilen får økt yaw. For en plate på 10 mm antyder tabellen at pilens hastighetsreduksjon alene vil kunne bidra med opp til 4% reduksjon i penetrasjonen. For en plate på 25 mm kan den samme reduksjonen komme opp i 8 %.

3.4.3 Pilens fartsretning

Fra Tabell 3-10 ser vi at fartsretningen til pilens massesenter maksimalt endrer seg med 1.6° når stålplaten er 10 mm tykk og med maksimalt 4° når stålplaten er 25 mm. Når vinkelen i disse to tilfellene endres fra henholdsvis 10° til 8.4° og 10° til 6.0° , betyr dette at pilen får en vei gjennom stålblocken som er redusert med henholdsvis 0.5% og 1.0%. Pilen rettes til en viss grad opp, og denne effekten vil da bidra til å øke pilens penetrasjonsevne.

3.4.4 Pilens vinkelhastighet

Vinkelhastigheten er for alle simuleringene så liten at betydningen av denne er neglisjerbar. I våre simuleringer har vi ikke registrert en vinkelhastighet som overstiger 3 rad/s. Siden pilen beveger seg typisk 1 meter på 0.7 ms, tilsvarer 3 rad/s en vinkelendring på ca 0.1° pr meter pilen tilbakelegger.

3.4.5 Pilens yaw

Når pilen har mye yaw, vil den ha en stor hastighetskomponent normalt på pilens akse. Dette vil gjøre at pilens overside nesten kontinuerlig gnisser mot stålplaten. Siden pilen er lang, vil denne kontakten være relativt lenge, og reduksjonen i denne hastighetskomponenten kan bli stor. Siden det er denne hastighetskomponenten som gjør at vi har yaw, kan en stillestående stålplate faktisk være med på å redusere pilens yaw.

For de syv simuleringene skissert i Figur 3-9 fikk pilen en yaw som oppgitt i Tabell 3-12 under:

Platetykkelse [mm]	Yaw $t=0$ ms	Variasjonsområde for yaw i tiden $t \in [0.6, 10]$ ms	Yaw $t=10$ ms
10 mm	0	[-0.06, 0.04]	0.02
	1	[0.62, 1.27]	0.71
	3	[0.21, 3.81]	1.33
	5	[3.21, 5.50]	3.70
	10	[8.95, 10.70]	9.33
25 mm	0	[-0.17, -0.05]	-0.16
	10*	61 mm rest av pil:	[-0.9, 16.3]
		409 mm rest av pil:	[4.9, 8.3]

Tabell 3-12: Yaw registrert i syv forskjellige simuleringer, der platetykkelse og yaw varieres. For den bøyde pilen beregnes yaw fra massesenterets fartsretning samt "vinkelmål B" definert i avsnitt 3.3.1.

* I simuleringen med 10° yaw og platetykkelse 25 mm brakk pilen i to deler med lengde 61 og 409 mm

I tabellen har vi angitt yaw-vinkelen ved simuleringenes start ($t=0$ ms) og slutt ($t=10$ ms). Etter at pilen hadde perforert stålplaten ($t=0.6$ ms) viste simuleringene at pilens yaw-vinkel varierte med tiden. Variasjonene var periodiske og lå innenfor det intervallet vi har oppgitt i tabellen.

Fra tabellen ser vi at yaw-vinkelen til en pil som har perforert en 10 mm tykk stålplate, i snitt blir noe redusert. Yaw-vinkelen varierer imidlertid, og den var for våre fem simuleringer tidvis høyere og tidvis lavere enn i tiden før platen ble perforert. Mer nøyaktig fant vi at pilens yaw i 60 % av tiden etter perforeringen var lavere enn før perforeringen.

Yaw-vinkelen til en pil som har perforert en 25 mm plate, viste seg å synke i begge våre simuleringer. I tiden etter 2.0 ms er pilens yaw hele tiden mindre enn opprinnelig.

Som i avsnitt 3.3.5 kan vi oversette endringen i yaw til endring i penetrasjonsytelse. Vi får da verdiene gitt i Tabell 3-13:

Platetykkelse [mm]	Yaw ved start av simulering [°]	Reduksjon i penetrasjonsdybde [%]			
		$t=0$ ms	Intervall for reduksjon når yaw varierer i tiden $t \in [0.6, 10]$ ms	$t=10$ ms	
10 mm	0	0	0	0	
	1	1	[0, 1]	0	
	3	4	[0, 6]	1	
	5	11	[5, 13]	6	
	10	32	[27, 35]	29	
25 mm	0	0	0	0	
	10*	61 mm rest av pil:	32	[0, 54]	0
		409 mm rest av pil:	32	[10, 24]	23

Tabell 3-13: Reduksjon i penetrasjonsdybde som følge av yaw. Reduksjonen måles i forhold til en pil uten yaw. Det gjøres oppmerksom på at pilen i enkelte av simuleringene er bøyd, og at dette gjør tallene usikre.

* I simuleringen med 10° yaw og platetykkelse 25 mm brakk pilen i to deler med lengde 61 og 409 mm

I Tabell 3-13 har vi funnet reduksjonen i penetrasjonsdybde for yaw-vinkelen ved simuleringenes start ($t=0$ ms), ved simuleringens slutt ($t=10$ ms) og for perioden som går fra $t=0.6$ ms til $t=10.0$ ms. I den sistnevnte perioden varierte pilens yaw-vinkel. Variasjonsområdet, som ble angitt i Tabell 3-12, er i tabellen over oversatt til et intervall for reduksjon i penetrasjonsdybde.

Tabell 3-13 antyder at virkningen av en 10 mm tykk stålplate er relativt liten. For en pil med 10° yaw angir tabellen en reduksjon i penetrasjonsdybde på 32%. Når pilen så forbekjempes med en stålplate, endres denne reduksjonen til et sted mellom 27 og 35%. Et intelligent APS-system vil ta hensyn til at pilen oscillerer og kan, ved å skyte ut motmiddelet til rett tid, sørge for at pilen treffer hovedpansringen med maksimal yaw. Med et slikt APS-system vil altså reduksjonen i penetrasjonsdybde endres fra 32 til 35%.

Når pilen i utgangspunktet har mye yaw, vil en stillestående 25 mm tykk stålplate til en viss grad stabilisere pilen. Vår simulering med en pil som har 10° yaw, gir at yaw-vinkelen reduseres minst ned til 8° (Kun et lite bruddstykke av pilen fikk økt yaw). Reduksjonen i penetrasjon som følge av yaw, endres da ifølge tabellen fra 32% og minst ned til 24%.

3.4.6 Erosjon av pilen

For to piler med samme geometri har man funnet eksperimentelt at penetrasjonsdybden i et

halv-uendelig mål er tilnærmet proporsjonal med pilens lengde. En 2% kortere pil vil gi 2% mindre penetrasjon. For å kunne bruke dette resultatet til å forutsi endringer i penetrasjonsdybden ut fra endringer i pilens lengde, antar vi som tidligere at alle påvirkninger på pilen kan behandles uavhengig av hverandre.

Fra Tabell 3-10 ser vi at pilen har en lengde på 487-489 mm etter at den har perforert den 10 mm tykke stålplaten. En slik endring på 2-3% i pilens lengde vil normalt bety at penetrasjonsdybden også reduseres med 2-3%.

Vi utførte kun to simuleringer med den 25 mm tykke stålplaten. Når pilen til å begynne med ikke hadde yaw, fant vi at pilens lengde minsket til 467 mm. Dette tilsvarer en reduksjon på ca 7% i penetrasjonsdybden.

3.4.7 Bøyning / oppbrekking av pil

En pil med 10° yaw, som skulle perforere en 25 mm stålplate, brakk når situasjonen ble simulert med Autodyns SPH-prosessor. Når en pil brekker, fås ofte en markant reduksjon i penetrasjonsytelsen. Denne reduksjonen er imidlertid vanskelig å estimere.

Ofte velger man å se på to forenklete tilfeller: I tilfeller der pilens forskjellige deler tydelig skiller lag, slik at hver enkelt del kan oppfattes som et uavhengig prosjektil, fås et grovt estimat for penetrasjonsdybden ved å betrakte den lengste gjenværende delen av pilen. I vårt tilfelle gir denne fremgangsmåten et estimat på 18% reduksjon i penetrasjonsdybde:

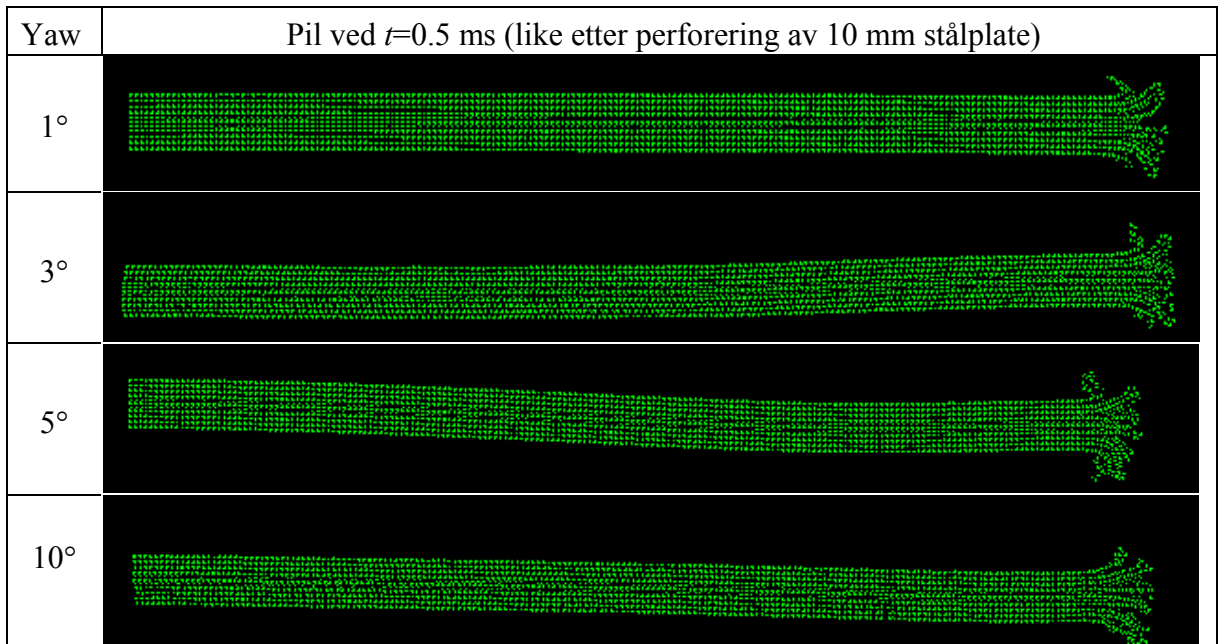
$$(500 - 409)/500 = 0.18 \quad (3-3)$$

I tilfeller der pilens bruddstykker ligger tett og følger på linje, vil effekten bli nær den effekten vi kan vente for en kompakt pil. I vårt tilfelle, der de to gjenværende delene hadde en sammenlagt lengde på 470 mm får vi et estimat på 6% reduksjon i penetrasjonsdybde:

$$(500 - 409 - 61)/500 = 0.06 \quad (3-4)$$

Ut fra disse enkle beregningene venter vi altså at erosjon og oppbrekking vil gi en reduksjon i penetrasjonsdybde på mellom 6% og 18%. Dette anslaget er imidlertid svært usikkert. Blant annet er det vanskelig å avgjøre hvorvidt pilen faktisk kommer til å brikke. Pilens egenskaper avhenger i stor grad av den wolframlegering som er benyttet i simuleringen, og som vist i avsnitt 2.7 har legeringenes seighet endret seg dramatisk de siste 10 årene. En annen kilde til usikkerhet ligger i simuleringsprogrammet vi har benyttet. Bruddet starter som en følge av egenskaper ved simuleringens SPH-kuler og ikke som følge av at en spesifisert fysisk størrelse vokser over en fastsatt verdi. Det at det ikke er en slik klar sammenheng mellom fysikken og SPH-kulenes sprekkdannelse, gjør at resultatet kan diskuteres.

Bøyning kan også være med på å påvirke pilens penetrasjonsytelse. I våre simuleringer med en 10 mm tykk stålplate, fant vi imidlertid at pilen bare bøyde seg i begrenset grad. Dette er illustrert i Figur 3-10:



Figur 3-10: Bilde av en wolframpil like etter at den har perforert en 10 mm tykk stålplate. Pilen startet med yaw som angitt i figuren.

Som for simuleringene med skrått anslag er ikke bøyningen konstant. Med en bestemt frekvens veksler pilen mellom å være bøyd og ubøyd.

Den maksimale bøyningen når forbekjempningen utføres med den 10 mm tykke stålplaten, er ifølge Tabell 3-10 på ca 10 mm. Siden krateråpningen kan beregnes til å ha en radius på ca 25 mm, betyr dette at bøyningen alene ikke vil gjøre at pilen slites mot veggene til penetrasjonskanalen. Nå er det imidlertid slik at pilen i flere av simuleringene også har yaw. Dette gjør at pilen i utgangspunktet ikke er sentrert i penetrasjonskanalen, og at pilens deformasjoner likevel vil kunne nå ut til penetrasjonskanalens vegger. Hva dette betyr for penetrasjonen er imidlertid vanskelig å tallfeste.

3.4.8 Total reduksjon i penetrasjonsdybde

Som nevnt i avsnitt 3.3.8 er det svært tidkrevende å simulere restpenetrasjonen til en pil som har perforert en stålplate. Vi har derfor begrenset oss til de simuleringene som er angitt i Tabell 3-14:

Yaw ved start av simulering [°]	Platetykkelse [mm]	Processor	Yaw i ° $t=1.8$ ms	Hastighet i m/s ved $t=1.8$ ms	Penetrasjon [mm]	Reduksjon i penetrasjon [%]
0	0	Lagrange	0	1500	399	
	0	SPH	0	1500	408	Referanse 0° yaw
	10	SPH	0.0	1487	388	5
	25	-	0.2	1474	-	-
5	0	Lagrange	5	1500	366	Referanse 5° yaw
	10	-	4.7	1480	-	-
10	0	SPH	10	1500	306	Referanse 10° yaw
	10	SPH	10.0	1473	305	0
	25	SPH	6.8	1437	307	0

Tabell 3-14: Reduksjon i penetrasjon for en pil med yaw. Pilen treffer ved $t=0$ ms en stålplate som den perforerer for deretter å treffe en stor stålblock ved $t=1.8$ ms. Verdien gitt for reduksjon i penetrasjon er sett i forhold til identiske kjøringene uten stålplate.

Fra tabellen ser vi at forbekjempning med stillestående plate kun i liten grad reduserer videre penetrasjon. Dersom pilen i utgangspunktet hadde mye yaw, ser det faktisk ut som penetrasjonsdybden i stålblocken er uendret med denne formen for forbekjempning.

I tidligere avsnitt har vi kommentert hvilke effekter som vi mener vil påvirke penetrasjonsytelsen. Vi skal nå summere bidragene og dermed antyde hvor effektiv en stillestående stålplate er til å forbekjempe en pil med yaw. Estimatenes for effektivitetsnedsettelsen er hentet fra de tidligere avsnittene og er derfor basert på antagelsen om at for eksempel endring i hastighet og pilens lengde påvirker penetrasjonsytelsen uavhengig av hverandre. I Tabell 3-15 har vi samlet våre grove estimater for den totale reduksjonen i penetrasjonsdybde og sammenlignet disse med simuleringene gitt i Tabell 3-14:

Platetykkelse [mm]	Yaw idet simuleringen starter [°]	Reduksjon i penetrasjon [%]					Sum	Simulering
		Endring i pilens hastighet	Endring i pilens fartsretning	Endring i yaw	Erosjon av pilen	Bøyning av pilen		
10	0	2	0	0	3	0	5	5
	1	2	0	-1 til 1	3	0	4 til 6	
	3	2	0	-4 til 2	2	+ ²	0 til 6+	
	5	3	0	-6 til 2	2	++	-1 til 8++	
	10	4	-0.5%	-5 til 3	2	+++	1 til 9+++	0
25	0	3	0	0	7	0	10	
	10	8	-1.0%	-22 til -8	6-18 ¹	+++	-9 til 17+++	0

Tabell 3-15: Prosentvis reduksjon av penetrasjonsytelse for de effektene som notatet har vurdert. Bidragene er antatt små og uavhengige, slik at de kan summeres og sammenlignes med simulerte verdier.

¹ Pilen brakk slik at estimatet blir usikkert

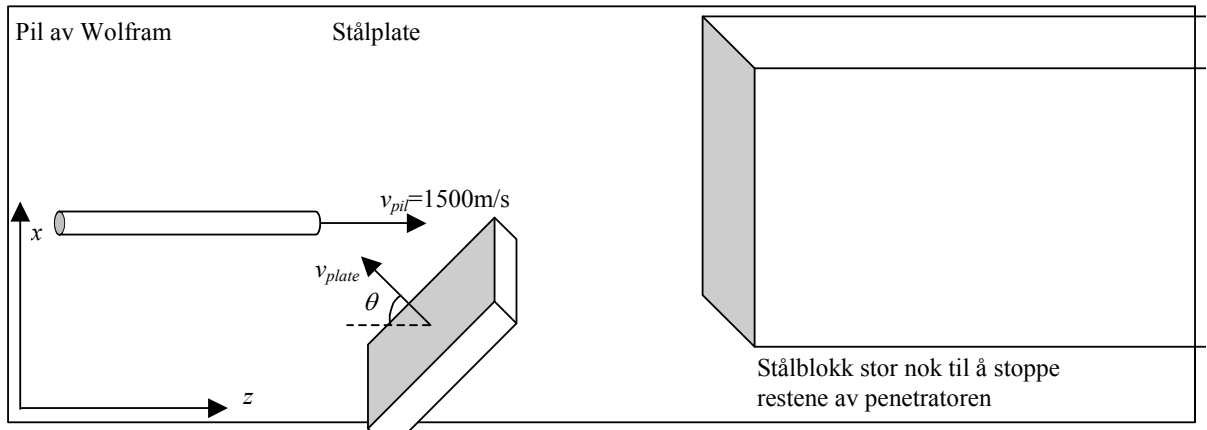
² Effekten av bøyning avhenger av yaw-vinkelen, og den vil ha størst betydning når pilens yaw er stor. Størrelsen lar seg ikke enkelt estimere, og vi har derfor antydnet at den vil ha betydning uten å angi verdi

Fra tabellen ser man at det er hastighetsreduksjon, erosjon av pilen, samt endringer i yaw som er de viktigste effektene som påvirker pilens penetrasjon. Pilen blir bremsset og erodert, samtidig som den også blir stabilisert (minskning i yaw). Det kan se ut som om disse tre

effektene tidvis kansellerer hverandre.

3.5 Pil mot bevegelig stålplate

Situasjonen som simuleres er skissert i Figur 3-11:



Figur 3-11: Skisse over simuleringen der en pil skytes mot en stålplate i bevegelse.

Det benyttes en sylindrisk pil av wolfram med radius 12.5 og lengde 500 mm. Pilen har en hastighet på 1500 m/s og treffer en stålplate med innfallsvinkelen θ . Stålplaten, med høyde 200 og bredde 300 mm, er enten 10 eller 25 mm tykk. Stålblokken som i enkelte simuleringer benyttes til å finne restpenetrasjon til pilen, har dimensjoner 105x399x598.5 mm.

Det nye i disse simuleringene er at også stålplaten har en hastighet. Dette gjør at pilen både får skrått anslag og yaw. I Tabell 3-16 har vi kort beskrevet hvilke kombinasjoner av platetykkelse, platehastighet og innfallsvinkel som simuleres:

Simulering Nr	Platens tykkelse [mm]	Platens hastighet [m/s]	Pilens innfallsvinkel [°]	Restene av pilen penetrerer også stålblokk
1	10	500	45	Nei
2	10	500	70	Ja
3	25	250	45	Nei
4	25	250	70	Nei
5	25	500	45	Ja
6	25	500	70	Ja

Tabell 3-16: Sammenstilling over hvilke simuleringer som er utført for bevegelig stålplate.

Materialmodellene som benyttes i simuleringene er beskrevet i Tabell 3-1.

3.5.1 Resultater

I mange av de situasjonene vi har simulert, fant vi at pilen brakk. Når pilen brytes, gjelder det som regel at penetrasjonsdybden minsker markant.

Som nevnt i avsnitt 3.4.7, kan det diskuteres om Autodyn er velegnet til å simulere

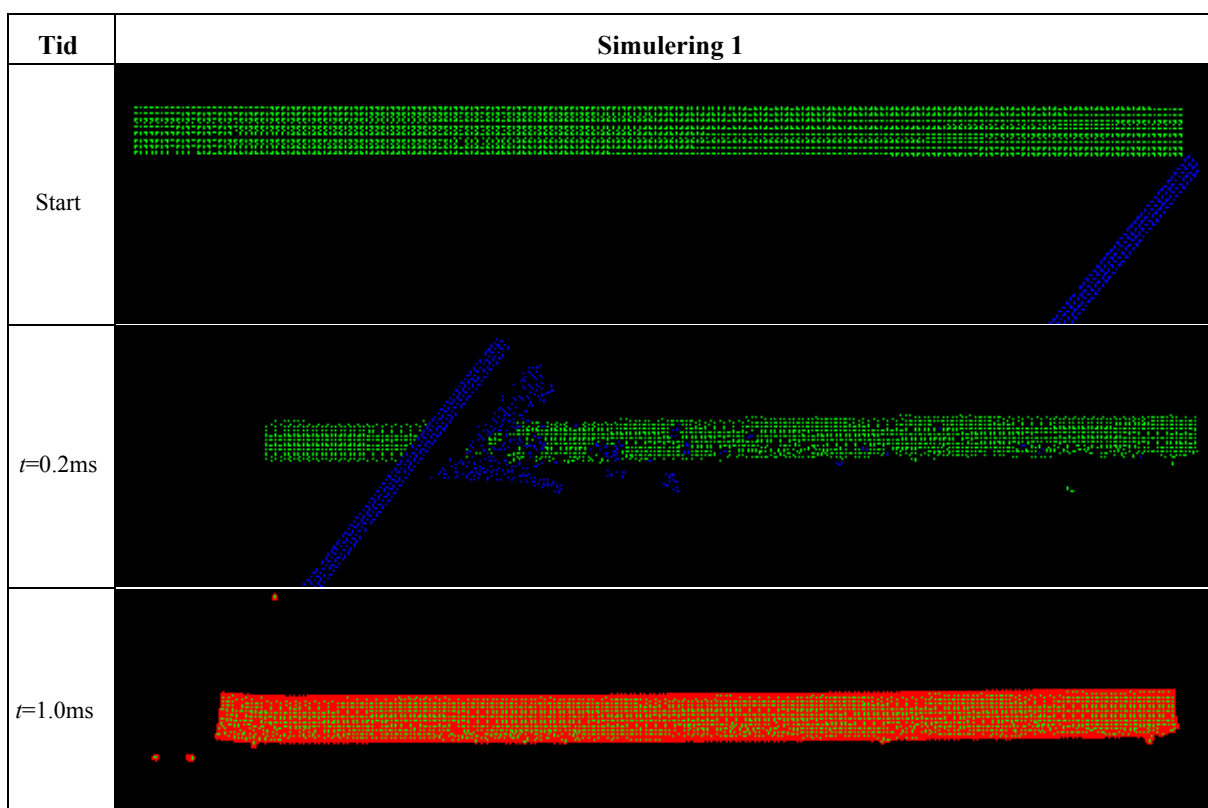
situasjoner der pilen brekker. Av den grunn kommer vi ikke til å diskutere simuleringene i detalj. Vi begrenser oss til å angi hvordan bevegelsen til massesenteret endrer seg og til å gi bilder fra simuleringene. Bildene er ment å gi eksempler på hvordan en typisk oppbrekking av pilammunisjon vil se ut.

Nr	Plate-tykkelse [mm]	Platens hastighet [m/s]	Innfallsvinkel [°]	Vx [m/s]		Vz [m/s]		Hastighet [m/s]		Massesenters fartsretning [°]	
				t=0 ms	t=1 ms	t=0 ms	t=1 ms	t=0 ms	t=1 ms	t=0 ms	t=1 ms
1	10	500	45	0	26	1500	1463	1500	1463	0	1.0
2			70	0	69	1500	1404	1500	1405	0	2.8
3	25	250	45	0	53	1500	1409	1500	1410	0	2.1
4			70	0	100	1500	1354	1500	1357	0	4.2
5		500	45	0	95	1500	1367	1500	1370	0	4.0
6			70	0	181	1500	1293	1500	1305	0	8.0

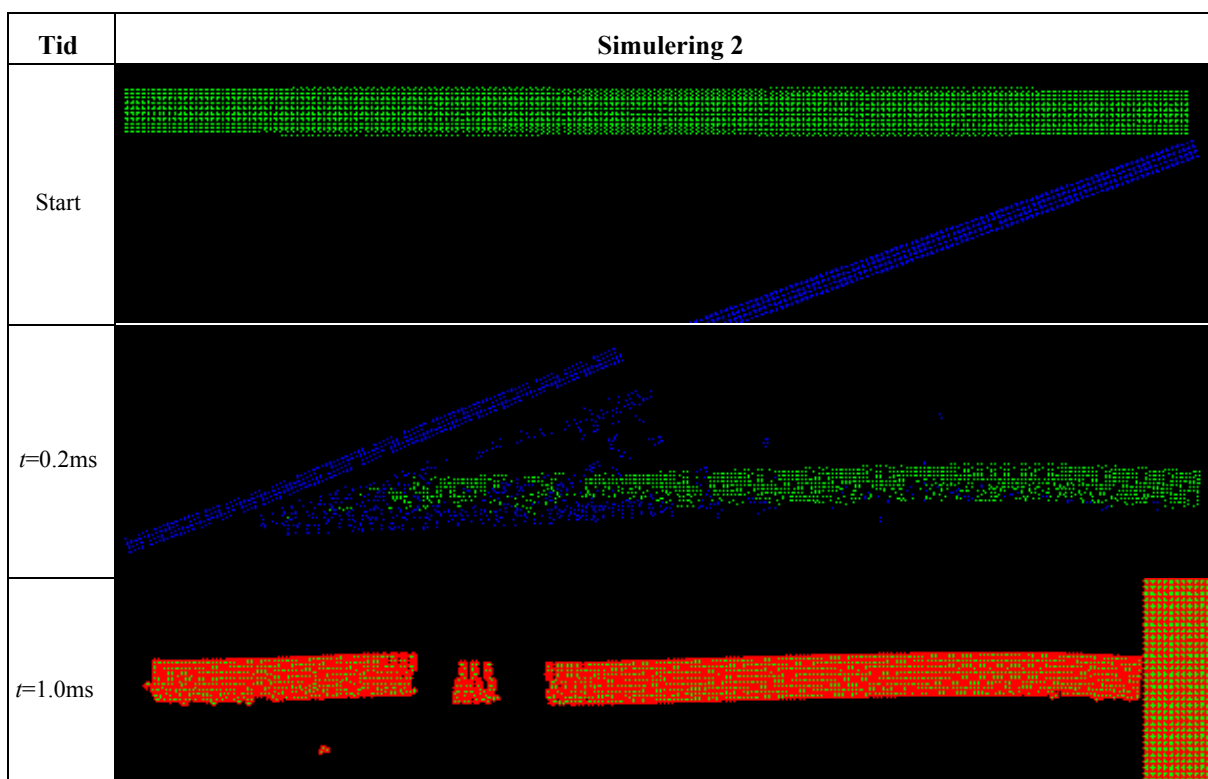
Tabell 3-17: Data som beskriver hvordan pilens massesenterbevegelse endrer seg når den treffer en 10 eller 25 mm tykk stålplate i bevegelse.

For simuleringene med stillestående stålplater kom massesenterhastigheten aldri under 1437 m/s. Når platene nå har hastighet, er det bare i ett tilfelle at pilen påvirkes i så liten grad. Spesielt er det verd å merke seg at den 10 mm tykke stålplaten som treffer pilen med en vinkel på 70°, faktisk bremser pilen mer enn noen av de 25 mm tykke stillestående stålplatene.

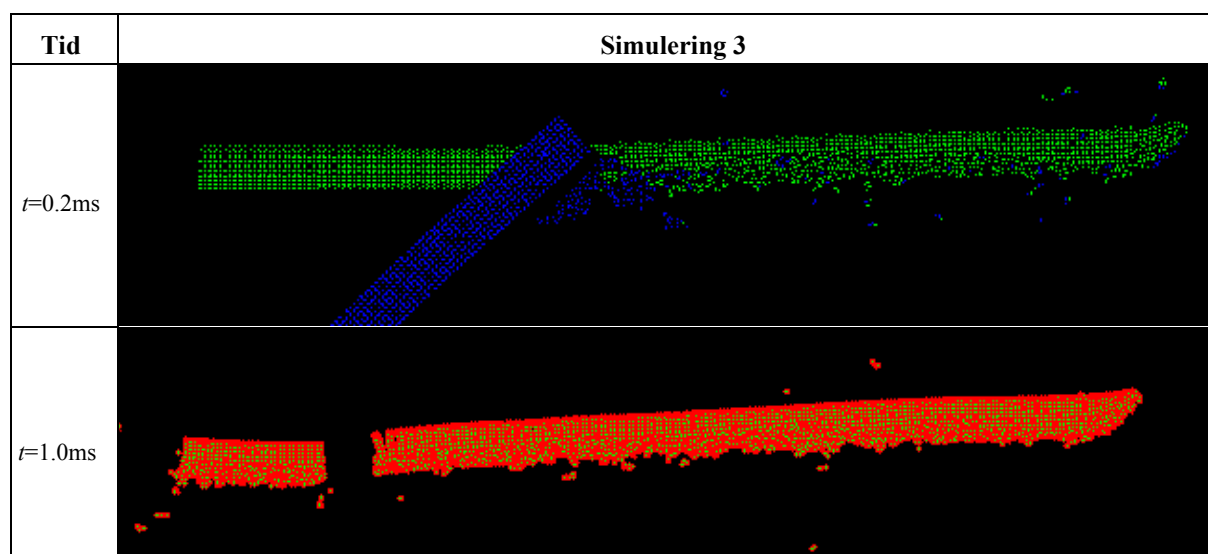
I tidligere simuleringer brakk pilen når den fikk en belastning som endret massesenterets fartsretning med 4°. For endringer under 1.6°, ble pilen bare bøyd. Hvordan pilen nå ble påvirket av stålplater i bevegelse, kan sees fra Figur 3-12 til Figur 3-17:



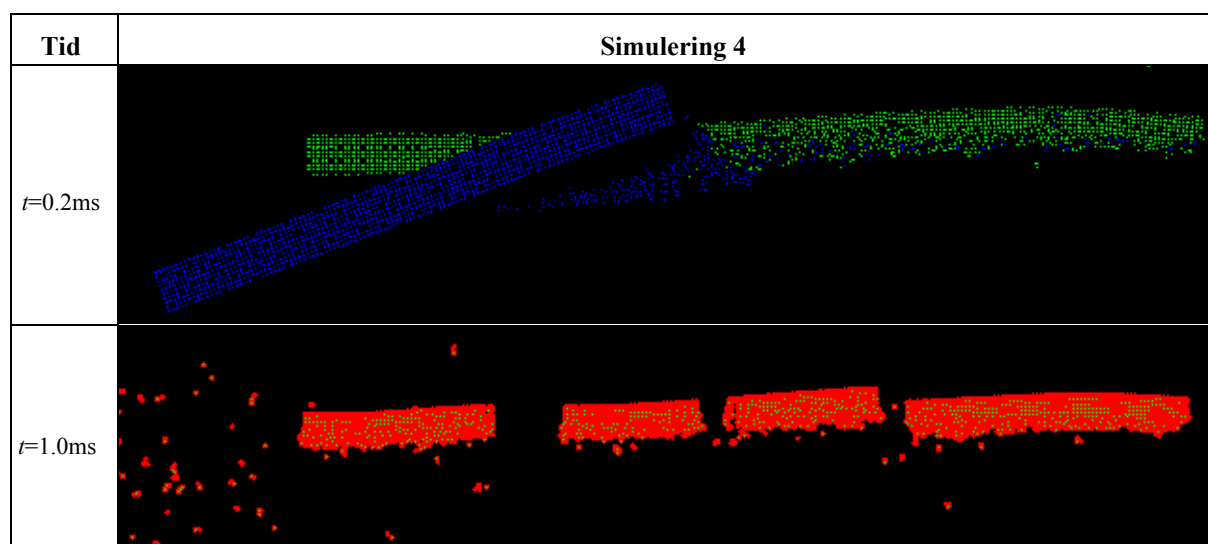
Figur 3-12: Simulering 1. En pil av wolfram treffer en 10 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 45° . Stålplatens hastighet er 500 m/s.



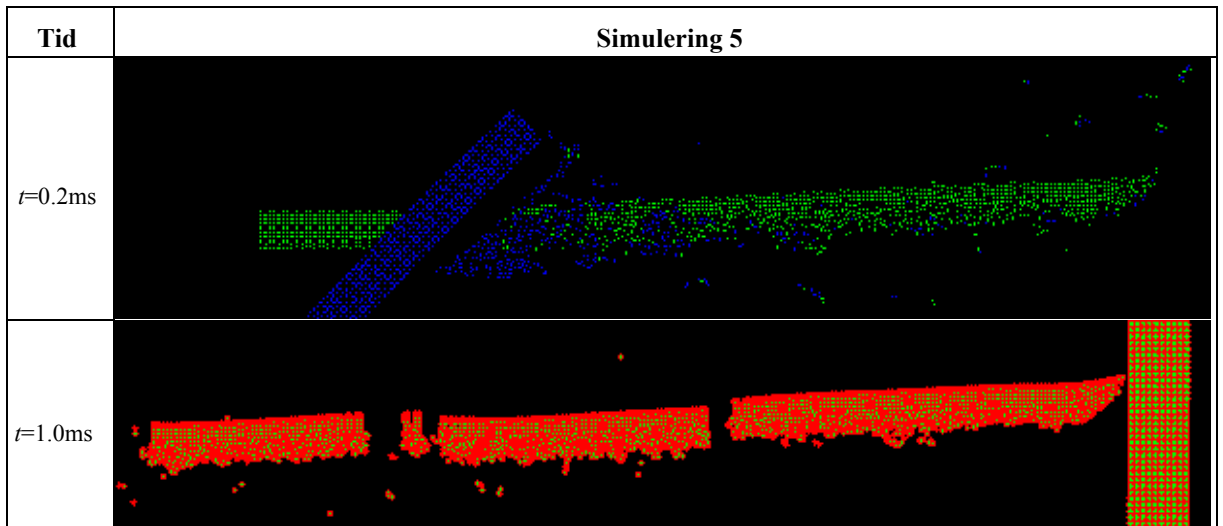
Figur 3-13: Simulering 2. En pil av wolfram treffer en 10 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 70° . Stålplatens hastighet er 500 m/s.



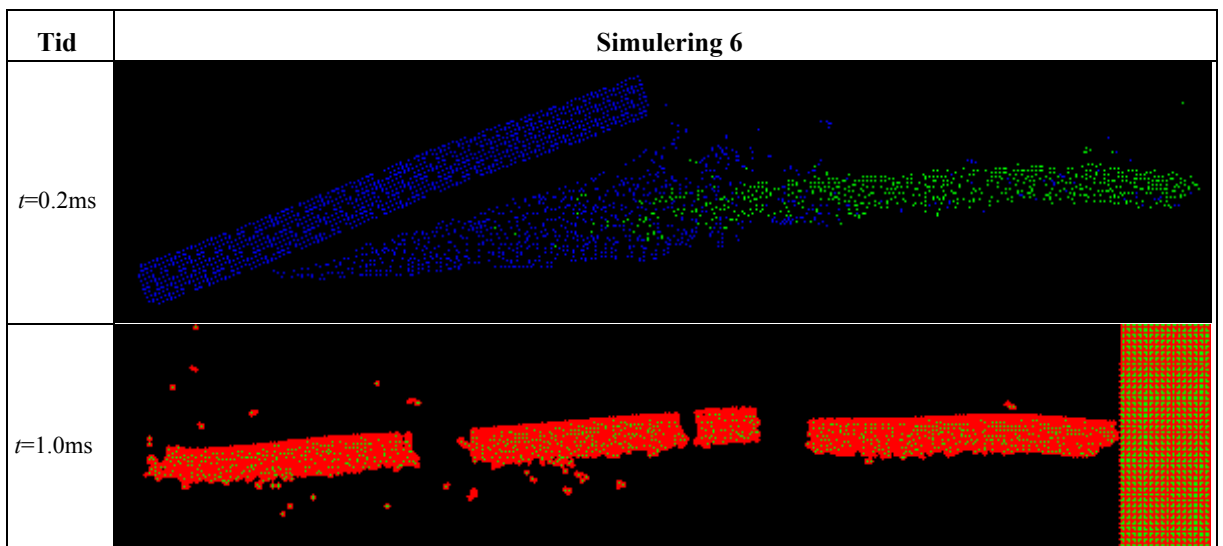
Figur 3-14: Simulering 3. En pil av wolfram treffer en 25 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 45° . Stålplatens hastighet er 250 m/s.



Figur 3-15: Simulering 4. En pil av wolfram treffer en 25 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 70° . Stålplatens hastighet er 250 m/s.



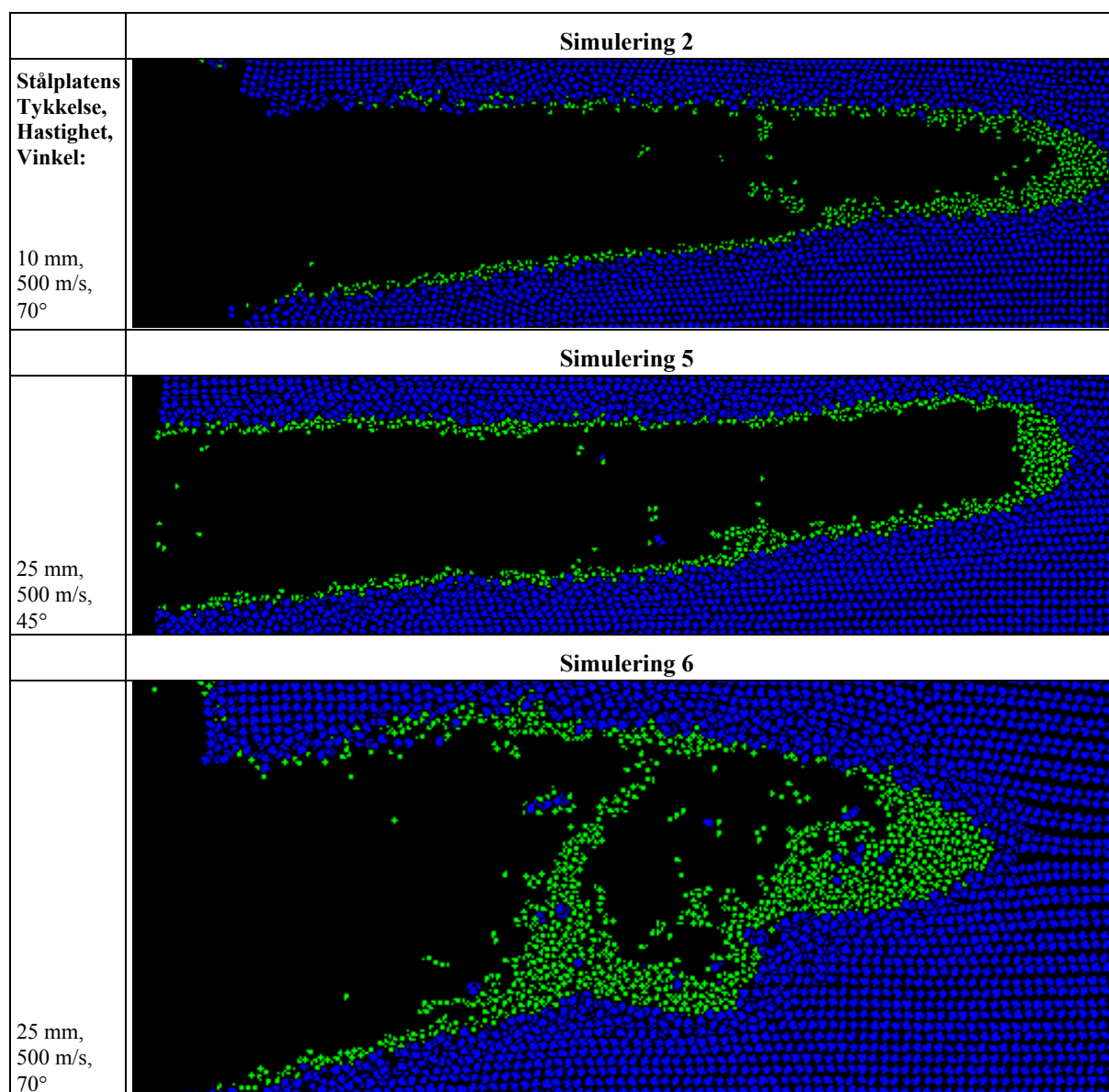
Figur 3-16: Simulering 5. En pil av wolfram treffer en 25 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 45° . Stålplatens hastighet er 500 m/s.



Figur 3-17: Simulering 6. En pil av wolfram treffer en 25 mm tykk stålplate med en innfallsvinkel på 70° . Stålplatens hastighet er 500 m/s.

Det er kun i én av de seks simuleringene at pilen ikke brenner.

Når pilen brenner, er det vanskelig å estimere penetrasjonsdybden. Dersom de forskjellige delene av pilen ligger på linje, blir reduksjonen liten. Eksempler på dette fås når restene fra simulering 2 og 5 fortsetter inn i en stor stålblock, se Figur 3-18. Dersom stålplaten påvirker pilen så mye at bruddstykkene faktisk treffer forskjellige områder av pansringen, da minsker penetrasjonsdybden markant. Et eksempel på dette fås når restproduktene fra simulering 6 fortsetter inn i en stålblock, se Figur 3-18.



Figur 3-18: Resultat når restene av pilene fra simulering 2, 5 og 6 forsetter inn i en stor stålblokk.

Resultatene fra de tre simuleringene der en brukket pil treffer en stor stålblokk, er gjengitt i Tabell 3-18:

Nr	Plate-tykkelse [mm]	Plattens hastighet [m/s]	Innfalls-vinkel mot stålplate [°]	Hastighet [m/s]		Lengde på rester av pil [mm]	Relativ lengde [%]	Penetrasjon [mm]	Reduksjon i penetrasjon [%]
				t=0 ms	t=1.0 ms				
-	0	-	-	1500	1500	500	100	408	0
2	10	500	70	1500	1405	335/147	67/29	379	7
5	25	500	45	1500	1370	210/147/119	42/29/24	381	7
6			70	1500	1305	191/148/126	38/30/25	256	37

Tabell 3-18: Penetrasjonsdybde til piler som brakk. Omtrentlig lengde på alle deler av pilen lengre enn 50 mm er gitt. Relativ lengde oppnås ved å dividere restlengde med pilens opprinnelige lengde.

Som nevnt i avsnitt 3.4.7, blir resultatene usikre når pilen bryter. Det virker likevel som

om penetrasjonsdybden reduseres med vinkelen og tykkelsen på stålplaten.

3.5.2 Diskusjon av resultater

Våre simuleringer med SPH-kuler er antagelig ikke egnet til å simulere en pil som brekker. Hvorvidt vi får oppbrekking og hvorvidt restene av pilene vil fortsette på linje, som våre simuleringer antyder, er dermed usikkert. Siden dette vil påvirke penetrasjonsevnen i svært stor grad, kan ikke simuleringene gi oss en klar konklusjon. Simuleringene er i større grad å regne som illustrasjoner på hvordan oppbrekking av en pil *kan* se ut og hvilken virkning den *kan* ha.

Dersom vi likevel skal trekke frem en konklusjon, må den bli at penetrasjonsdybden jevnt over påvirkes lite av tynne stålplater. Med en 10 mm tykk stålplate ga forsøksoppsettet i Figur 3-11 en reduksjonen på bare 7%. Med en 25 mm tykk stålplate økte effekten av forbekjempning med innfallsvinkelen. For denne platetykkelsen ser det ut som om innfallsvinkelen bør være over 45° for at forbekjempningen skal bli effektiv.

4 KONKLUSJON

Denne rapporten, som har studert penetrasjonsytelsen til en tungmetallpil, består av to hoveddeler. Den første har gjengitt sentrale penetrasjonsformler fra litteraturen, mens den andre har beskrevet konkrete simuleringer utført ved FFI. Simuleringene har hatt som mål å avdekke potensialet til tynne stålplater når det gjelder å bekjempe pilammunisjon.

Rapportens første del, som altså er en litteraturstudie, har blant annet sett på hvordan variasjoner i pilens lengde, hastighet, yaw, strekkstyrke og tykkelse påvirker penetrasjonen. Ved å benytte formler, som er gitt i rapporten, kan det anslås hvordan dagens pilammunisjon påvirkes av disse størrelsene. Når pilen er 500 mm lang, har radius 12.5 mm og hastighet 1500 m/s, vil en 20% økning av lengden typisk gi en 20% økning i penetrasjonen. Mens en 20 % økning i hastigheten typisk gir 30% bedret penetrasjon, vil en endring i yaw fra 0° til 10° bety en reduksjon på ca 30%. Typiske variasjoner i pilenes hardhet kan endre penetrasjonsdybden rundt 10%. Pilenes form har også en betydning for penetrasjonen. For den skisserte pilammunisjonen, er forholdet mellom pilens lengde og diameter lik 20. Dersom pilens diameter reduseres, slik at dette forholdet blir 25, vil penetrasjonen reduseres med ca 5%.

Hvorvidt en pil brekker, bestemmes for en stor del av pilens strekkstyrke. Denne størrelsen er svært sentral i beskrivelsen av en pil, siden en pil som brekker ofte får en dramatisk reduksjon i penetrasjonsytelsen. Selv om effekten av oppbrekking som regel er stor, er det viktig å være klar over at dette ikke *må* være tilfellet. Dette kommer av at en pil ikke brekker på samme måte i to etterfølgende skyteforsøk. Selv om piltypen er den samme, vil man for forskjellige skudd ha at de gjenværende delene av pilen har varierende yaw, varierende størrelse og de vil treffe varierende område av pansringen. Som en følge av dette

vil naturligvis også effekten av pilen variere. Faktisk er det slik at en brukket pil i spesielle tilfeller kan ha tilnærmet samme effekt som en upåvirket pil. Tilfeldighetene / påvirkningen av pilen må da ha vært slik at pilens rester så å si er uten yaw og at disse restene følger pent på linje.

Rapportens andre del har studert tre situasjoner der vi forsøker å forbekjempe en pil med en stålplate.

I vår første situasjon kom pilen skrått inn mot både stålplate og stålblokk. Med dette oppsettet fant vi at et 70° skrått anslag reduserte penetrasjonsdybden med 15% og at reduksjonen økte til 30% når vi benyttet en 10 mm stillestående stålplate til å forbekjempe pilen. Oppsettet fungerte med andre ord bra når innfallsvinkelen var nær 70° . Uten vinkel mellom plate og pil derimot, ble virkningen av stålplaten forsvinnende liten. Den totale reduksjonen i penetrasjon sank faktisk helt ned til 5%. Simuleringene ble også utført med en stålplate på 25 mm. Effekten av dette motmiddelet var noe bedre, men heller ikke denne stålplaten hadde vesentlig virkning når innfallsvinkelen var liten.

I vår andre situasjon antok vi at pilen i utgangspunktet hadde yaw og at den kom normalt inn mot pansringen. Simuleringene viste som ventet at en pil med yaw får kraftig redusert ytelse. Med en yaw-vinkel på 10° gikk penetrasjonen ned med så mye som 25%. Når vi deretter introduserte forbekjempning med stillestående plater, fant vi overraskende nok at dette ikke endret pilens penetrasjon. Gevinsten av at stålplaten både bremsset og eroderte pilen, ble oppveid av at stålplaten også reduserte pilens yaw.

I vår tredje situasjon kom en pil normalt inn mot hovedpansringen. Før pilen nådde frem til hovedpansringen treffes den her av en utskutt, skråstilt stålplate. Så lenge platetykkelsen var 10 mm eller vinkelen mellom plate og pil under 45° , fant vi at dette oppsettet i liten grad påvirker penetrasjonen. Med en innfallsvinkel på 70° og platetykkelse på 25 mm ble imidlertid oppsettet effektivt, og vi fant en reduksjon i penetrasjonen på nesten 40 %.

Simuleringene som er utført, har vist at det kan være effektivt å forbekjempe piler med stålplater. Det er imidlertid svært viktig å sørge for at pilen treffer stålplaten med en stor innfallsvinkel. For innfallsvinkler under 45° ble effekten av stålplaten lav. Tykkelsen på stålplaten bør helst være mer enn 10 mm. Med en 25 mm stålplate ble pilens penetrasjon jevnt over tydelig redusert.

Litteratur

- (1) W Lanz, W Odermatt, "Penetration Limits of Conventional Large Caliber Anti Tank Guns / Kinetic Energy Projectiles", 13th International Symposium on Ballistics, 1992.
- (2) C Anderson Jr, B L Morris, "The ballistic Performance of Confined Al₂O₃ Ceramic Tiles", Int J Impact Engnr 12 (2) pp 167-187, 1992.
- (3) J Walker, C Anderson Jr, D Goodlin, "Tungsten into steel penetration including velocity L/D and impact inclination effects", 19th International Symposium of Ballistics, 2001.
- (4) R Subramanian, S J Bless, "Reference correlations for tungsten long rods striking semi-infinite steel targets", 19th International Symposium of Ballistics, 2001.
- (5) C E Anderson Jr, J D Walker, S J Bless and Y Partom, "On the L/D Effect for Long-Rod Penetrators", Int. J Impact Engnr, 18(3), pp 247-264, 1996.
- (6) J Walker, C E Anderson Jr, "A time-dependent Model for Long-Rod penetration", Int J Impact Engnr, 16 (1), pp 19-48, 1995.
- (7) T W Bjerke, G F Silsby, D R Scheffler, R M Mudd, "Yawed Long-Rod Armor Penetration", Int J Impact Engnr, 12 (2), pp 281-292, 1992.
- (8) V Hohler, T Behner, "Influence of the Yaw Angle on the Performnce Reduction of Long Rod Projectiles", 18th International Symposium on Ballistics, pp 931-938, 1999.
- (9) W Lanz, W Odermatt, G Weihrauch, "Kinetic Energy Projectiles: Development History, State of the art, Trends", 19th International Symposium of Ballistics, 2001.
- (10) J M Campos, W Reinecke, S Bless, "A Parameter that combines the Effects of Bend and Angle of Attack on Penetration degradation of Long Rods", 19th International Symposium of Ballistics, 2001.
- (11) Z Rosenberg, E Dekel, "A Computational study of the Influence of Projectile Strength on the Performance of Long-Rod Penetrators", Int J Impact Engnr 18 (6), pp 671-677, 1996.
- (12) D L Littlefield, C E Anderson Jr, Y Partom, S J Bless, "The penetration of Steel Targets Finite in Radial Extent", Int J Impact Engnr 19 (1), pp 49-62, 1997.
- (13) Y Me-Bar, "A Method for Scaling Ballistic Penetration Phenomena", Int J Impact Engnr, 19, 1997.
- (14) Z Rosenberg, R Kreif, E Dekel, "On the Geometric Scaling of Long-Rod Penetration", 16th International Symposium on Ballistics, 1996.
- (15) Century Dynamics Limited, "Theory Manual Revision 4.0", Century Dynamics Limited, Dynamics House, Hurst Road Horsham, West Sussex RH12 2DT, England, 1998.
- (16) P Lundberg, L Holmberg, "Replica Modelling Experiments with Long Rod Projectiles into Homogenous Armour Steel", 16th International Symposium on Ballistics , 1996.

- (17) C E Anderson, Jr, B L Morris, D L Littlefield, "A Penetration Mechanichs Database", SwRI Report 3593/001, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1992.
- (18) B R Soresen, K D Kimsey, G F Silsby, D R Scheffler, T M Sherrick and W S DeRosset, "High velocity penetration in steel targets", Int J Impact Engrnr 11, pp 107-119, 1990.

FORDELINGSLISTE

FFIBM **Dato:** 8 mai 2003

RAPPORTTYPE (KRYSS AV) <input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR	RAPPORT NR. 2003/01799	REFERANSE FFIBM/798/139	RAPPORTENS DATO 8 mai 2003
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD UGRADERT		ANTALL EKS UTSTEDT 30	ANTALL SIDER 57
RAPPORTENS TITTEL KE-penetrasjon i panserstål - Artikkelgjennomgang og simuleringer		FORFATTER(E) Kvifte, Lars	
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF Stein Grinaker		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: Jan Ivar Botnan	

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		HST	9		FFI-Bibl
1		FLO/Land	1		FFI-ledelse
1		v/ Oblt S Tinholt	1		FFIE
1		KAMPUKS	1		FFISYS
1		v/ Ob J Janssen	1		E Østevold, FFIBM
1		v/ Maj J I Hyndøy	1		O Dullum, FFIBM
1		KAMPUKS/SVI	1		A Skjold, FFIBM
1		v/ Kapt K Nygård	1		J Teland, FFIBM
			1		L Kvifte, FFIBM
			5		Restopplag til Biblioteket
Elektronisk fordeling: FFI-veven: S Grinaker (SGr), FFIBM B Haugstad (BjH), FFIBM M Halsør (Mha), FFIBM E Svinsås (ESv), FFIBM H Sjøel (HSj), FFIBM F Dahl (FAD), FFISYS					

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.