

FFI RAPPORT

SLUTTRAPPORT FOR PROSJEKT 766 - PENETRASJON I BETONG OG FJELL

SVINSÅS Eirik, TELAND Jan Arild

FFI/RAPPORT-2003/01999

FFIBM/766/130

Godkjent
Kjeller 15. juli 2003

Bjarne Haugstad
Forskningsjef

**SLUTTRAPPORT FOR PROSJEKT 766 -
PENETRASJON I BETONG OG FJELL**

SVINSÅS Eirik, TELAND Jan Arild

FFI/RAPPORT-2003/01999

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

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-2003/01999 1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/766/130	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 45		
4) TITLE SLUTTRAPPORT FOR PROSJEKT 766 - PENETRASJON I BETONG OG FJELL FINAL REPORT FOR PROJECT 766 - PENETRATION INTO CONCRETE AND ROCK				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) SVINSÅS Eirik, TELAND Jan Arild				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>Penetration</u> b) <u>Concrete</u> c) <u>Rock</u> d) <u>Numerical simulation</u> e) <u>Analytical theory</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Penetrasjon</u> b) <u>Betong</u> c) <u>Fjell</u> d) <u>Numerisk simulering</u> e) <u>Analytisk teori</u> </td> </tr> </table>			a) <u>Penetration</u> b) <u>Concrete</u> c) <u>Rock</u> d) <u>Numerical simulation</u> e) <u>Analytical theory</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Penetrasjon</u> b) <u>Betong</u> c) <u>Fjell</u> d) <u>Numerisk simulering</u> e) <u>Analytisk teori</u>
a) <u>Penetration</u> b) <u>Concrete</u> c) <u>Rock</u> d) <u>Numerical simulation</u> e) <u>Analytical theory</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Penetrasjon</u> b) <u>Betong</u> c) <u>Fjell</u> d) <u>Numerisk simulering</u> e) <u>Analytisk teori</u>			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT <p>The activities within Project 766 – Penetration into concrete and rock are described. The main aim has been to establish "state-of-the-art" methods for predicting the effect of precision guided missiles against hardened concrete and rock targets.</p> <p>Theoretical tools ranging from analytical formulas up to full 3D parallel computer simulations have been established. A 30 mm laboratory powder gun has been designed, built and tested, and equipment for quasi-static material testing has been installed.</p> <p>It is noted that material models and numerical schemes for hydrocodes are more developed than the experimental methods needed to produced relevant material data. In particular, methods, and hence data, for damage evolution in plastic flow and strain rate dependence in tri-axial shear strength are lacking.</p>				
9) DATE 15. July 2003	AUTHORIZED BY This page only Bjarne Haugstad	POSITION Director of Research		

ISBN 82-464-0743-0

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	BAKGRUNN	7
2.1	Utvikling av moderne våpensystemer	7
2.2	Betong som konstruksjonsmateriale	9
2.3	Beregningsmetoder for penetrasjon og dynamiske laster	10
3	KONKRETE MÅL FOR ARBEIDET	11
4	DP1: MATERIALKARAKTERISERING AV BETONG OG FJELL	11
4.1	Generelt	11
4.2	Kvasistatisk materialtesting	13
4.2.1	Standardiserte tester	13
4.2.2	Gauged Reactive Confinement / GREAC-celle	13
4.2.3	HOEK-celle	16
4.3	Dynamisk materialtesting	16
4.3.1	Split Hopkinson Bar	17
4.3.2	Flyer Plate Impact	17
4.3.3	Dynamisk materialtesting i Prosjekt 766	18
5	DP2: SKYTEFORSØK OG SIMULERINGER AV KE-VÅPENS PENETRASJON	18
5.1	Hydrokodeberegninger	18
5.1.1	Generelt	18
5.1.2	Hydrokoden AUTODYN	19
5.1.3	Materialmodeller	20
5.1.4	Programmering og bruk av subrutiner i Autodyn	20
5.2	Hybridberegninger – kombinasjon av numeriske og analytiske metoder	22
5.3	Metoder basert på analytisk teori	24
5.3.1	Oppsummering av alternative empiriske formler	24
5.3.2	Forrestals formel generalisert til ulike prosjektilgeometrier	26
5.3.3	Beregning av virkningen fra tandemladninger	26
5.3.4	Randeffekter ved endelig målstørrelse	26
5.3.5	Perforasjon (gjennomslag)	28
5.3.6	Evaluering av analytiske beregninger mot hydrokoder	29
5.4	Datamaskinverktøy basert på analytisk teori	29
5.5	Gjennomføring av skyteforsøk	30
6	DP3: BYGGING AV INSTRUMENTERT KANON	31
6.1	Laboratoriekanon - 30 mm kaliber	31

6.2	Utstyr for hastighetsmåling	33
6.3	Fluiddynamikk	34
7	DP4: MATERIALDATABASE FOR FJELL	35
8	OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER	36
8.1	Hovedkonklusjoner	36
8.2	Numeriske beregninger - spesielle svakheter som er avdekket	38
8.3	Problemer som ikke har vært behandlet	39
8.4	Videre arbeid	39
	REFERANSER	41
A	NOTASJON	44
	Fordelingsliste	45

SLUTTRAPPORT FOR PROSJEKT 766 - PENETRASJON I BETONG OG FJELL

1 INNLEDNING

Fjellanlegg og fortifiserte anlegg har tradisjonelt spilt en stor rolle i det norske forsvaret. Utvikling av presisjonsstyrte penetrerende våpen har imidlertid ført til usikkerhet om nytteverdien av slike anlegg i et tenkt konfliktsenario. Samtidig fører utviklingen av bedre overvåkningssensorer og UAV-teknologi, samt utplassering av stadig flere satellitter til at sårbarheten til mobile plattformer kan øke dramatisk i nær fremtid. FFI har manglet metodegrunnlag og utstyr for å gjennomføre troverdige analyser av sårbarheten til stasjonære anlegg, slik at en avveining mellom verdien av stasjonære og mobile plattformer kan gjøres.

Hovedformålet med Prosjekt 766 har derfor vært å etablere høy kompetanse og state-of-the-art-metoder for beregning av virkningene av moderne KE-våpen, som flyleverte bomber og stridshoder båret av kryssermissiler.

Metodene som prosjektet har etablert eller undersøkt kan også benyttes til beregninger av andre typer problemer. Eksempler kan være:

- Virkningen av detonasjoner (som vanligvis også er en virkning fra et missil)
- Beregning av ytelsen til moderne beskyttelsesmaterialer som keramikk og fiberlaminater benyttet på kjøretøy og i personlig beskyttelse
- Vurdering av yteevne til nye våpensystemer til egne styrker

Et viktig sekundærmål har i henhold til dette vært å etablere et fremtidsrettet miljø for avanserte beregninger av beskyttelses- og våpensystemer i vid forstand.

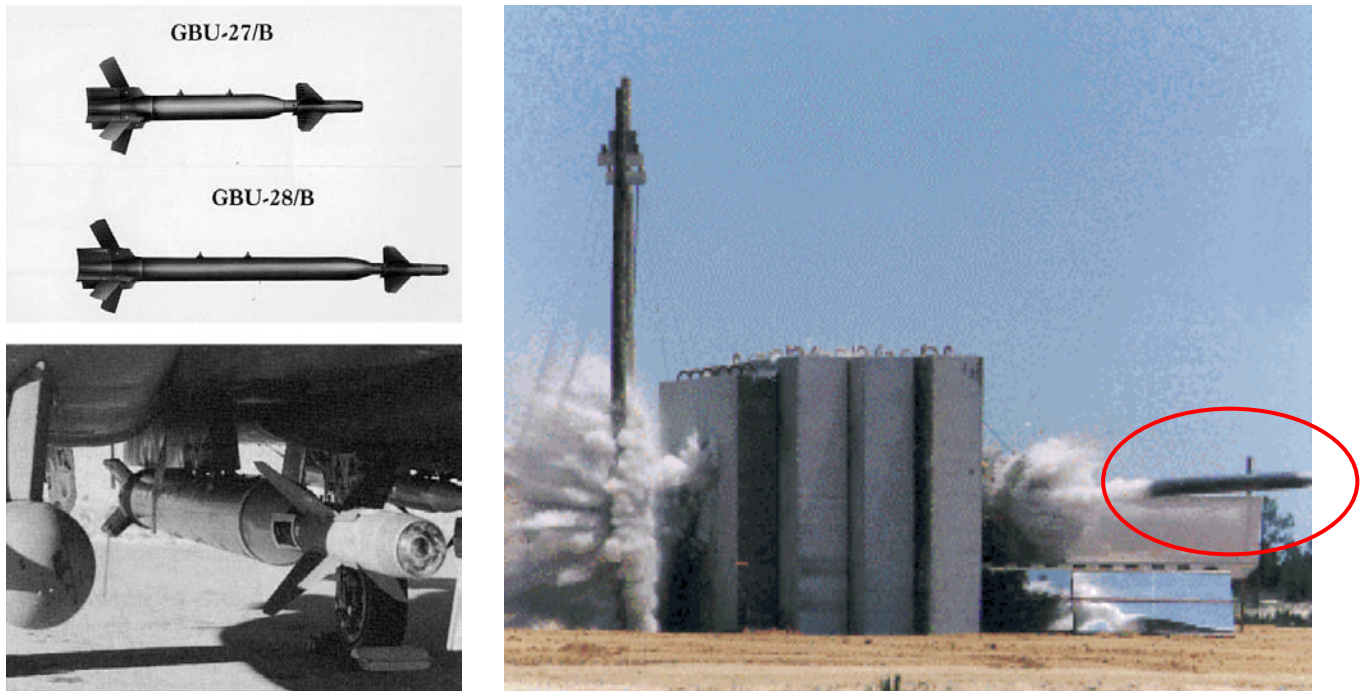
2 BAKGRUNN

2.1 Utvikling av moderne våpensystemer

De seneste årene har det foregått en rask utvikling av sensorer og styringssystemer for moderne våpensystemer. Ved hjelp av teknologier som GPS, laserstyring og terrengfølging ved hjelp av billeddannende sensorer og en kartdatabase, finnes i dag muligheter for å styre et missil (eller en flylevert glidebombe) med svært stor nøyaktighet. En treffnøyaktighet ned mot 1 meter kan på sikt oppnås, slik at et mål i teorien kan slås ut effektivt og med små skader på målobjektets omgivelser (følgeskader/"collateral damage")

Utviklingen av styringssystemer har åpnet for muligheten til å optimalisere stridshodet med hensyn på penetrasjonsevne, i motsetning til ustyrte våpensystemer som normalt optimaliseres for en mer områdedekkende virkning. Eksempler på moderne systemer er den amerikanske laserstyrte bomben GBU-28 med penetratoren BLU-113A/B som veier 2270kg. Denne skal

kunne penetrere mer enn 6 m betong (Figur 2.1) eller 30 m jordsmonn. Ytelsen mot harde fjellkvaliteter er imidlertid mer usikker, siden penetratorens mekaniske styrke kan bli kritisk i slike tilfeller.



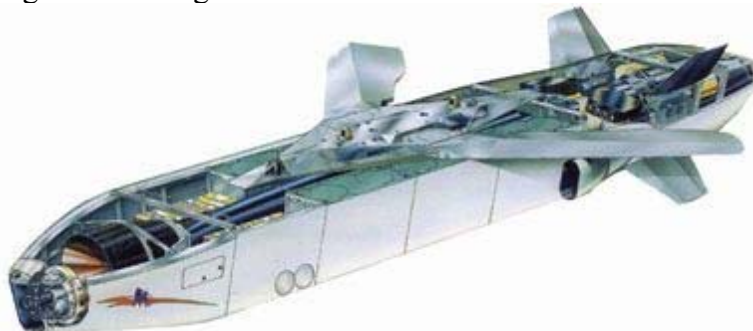
Figur 2.1: Test av GBU-28 mot et 6 m tykt betongmål

Et kryssermissil er i prinsippet et lite fly med tilstrekkelig nyttelast til å frakte ett stridshode. Flere typer er basert på oppgradering av eldre missiler med atomstridshode. Den amerikanske Tomahawk er et slikt eksempel. Fremtidige versjoner av denne vil utstyres med en "Advanced Unitary Penetrator" som ikke står svært langt tilbake for GBU-28 i gjennomslagsevne. Andre kryssermissiler er utviklet fra, eller kan enkelt utvikles fra anti-skips-missiler. Mindre systemer vil komme i fremtiden, dels for å kunne bæres inne i skroget på STEALTH-fly (eksempelvis F117 eller en fremtidig FB-22), dels for å øke antallet bomber det er mulig å medbringe på tradisjonelle flytyper. Den amerikanske SDB (Small Diameter Bomb) med en diameter på bare 15 cm er et eksempel.

I fremtiden vil høyere terminalhastighet for missiler være mulig. I AGARDS studie "Aerospace 2020" (1) konkluderes det med at det vil være mulig å produsere et sakalt "Hypersonic Air-Breathing Missile" (HABM), med terminalhastighet på mer enn Mach 8, og en penetratormasse på 500 kg. Denne utviklingen gjelder så langt høyteknologiske nasjoner (USA, europeiske land og Russland). På sikt kan teknologien imidlertid tenkes å få større utbredning.

Et tradisjonelt stridshode er designet for å bryte gjennom et mål for deretter å detonere på innsiden. Sprengstoffmengden og veggtykkelsen på stridshodet avpasses til hverandre for å gi tilstrekkelig strukturell styrke til selve penetrasjonsprosessen, samtidig som sekundæffektene ved omsetning inne i målet blir størst mulig. For svært harde målmaterialer vil dette ikke være mulig med en enkelt penetrator – stridshodet vil brytes opp under penetrasjonsprosessen. Er hastigheten høy nok, kan ødeleggelsene inne i målet likevel bli store. En annen, og ofte mer effektiv måte å optimalisere virkningen på er ved bruk av tandemstridshoder. En hulladning settes av før hovedpenetratoren, og danner en "styrekanal" som både muliggjør hovedladningens

inntrengning og større anslagsvinkel.



Figur 2.2: Missilet "TAURUS" (Target Adaptive Unitary & Dispenser Robotic Ubiquity System) med tandemstridshodet "Mephisto". Hulladning og fremre del av hovedmissilet er synlig

Da prosjekt 766 ble startet opp, var fokus fremdeles rettet mot at viktige anlegg i fjell kunne være svært sårbare. Presisjonsstyrte våpen kan treffe åpninger inn til anlegget, og høyere missilhastigheter eller tandemstridshoder øker også muligheten for penetrasjon gjennom overdekningen. Utstøtning på innsiden av anlegget på grunn av sjokkbølger som dannes ved treff eller etterfølgende detonasjon må også tas hensyn til.

De seneste få årene har fokus i økende grad blitt dreid bort fra scenarier som innbefatter strid på norsk jord. Bruk av penetrerende våpen er likevel så sentralt i operasjoner det norske forsvaret kan komme til å delta i, at en grunnleggende innsikt i ytelse og potensiale synes å være vital.

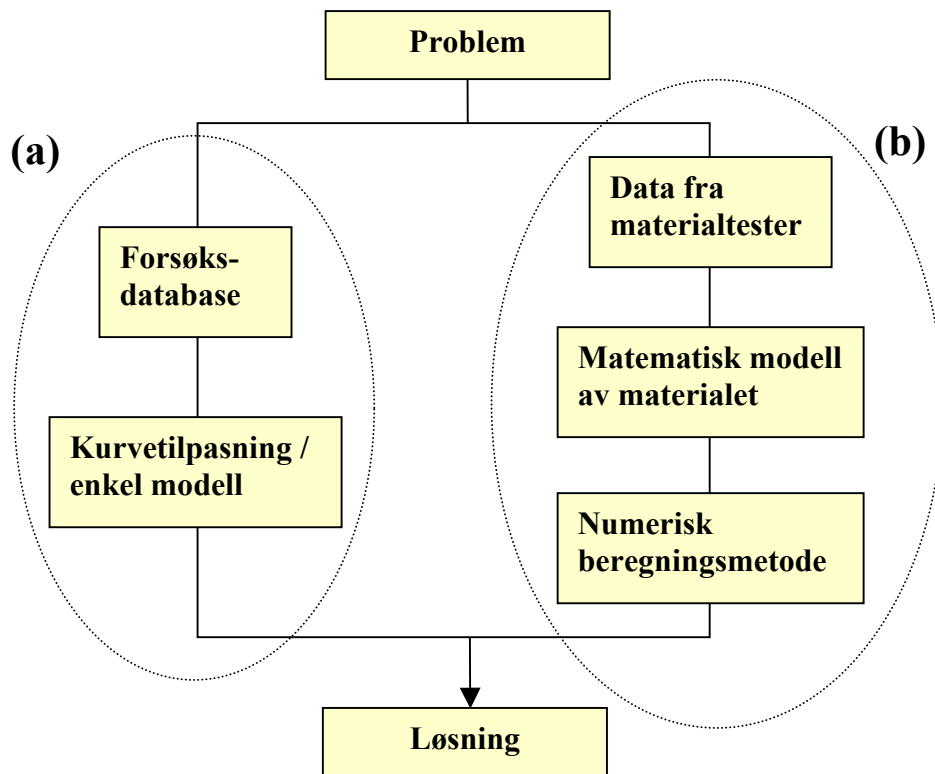
2.2 Betong som konstruksjonsmateriale

Betong er det mest anvendte konstruksjonsmaterialet i verden. Det er også mye brukt til stillinger og stasjonære anlegg i forsvarssammenheng, siden det gir en rimelig grad av beskyttelse til en forholdsvis lav kostnad. Til tross for at det er svært alminnelig og lavteknologisk, er det meget krevende å beskrive matematisk. Betong i herdet tilstand består av et tilslagsmateriale av naturstein som er innbakt i et sterkt, men sprøtt og porøst bindemiddel. Tilslaget er av varierende kvalitet, og kornene av ulik størrelse.

Oppførselen under overbelastning og brudd er svært komplisert. Dette innebærer at dersom man behersker de testmetodene som kreves for å fremskaffe relevante materialdata og de modellene som brukes til beskrivelsen, vil man være godt skodd til å behandle de fleste andre materialtyper. Eksempelvis vil tilslag av granitt ha klare paralleller til keramiske materialer med hensyn til hardhet og sprøhet. Den porøse sementen har på sin side likhetstrekk med geologiske materialer som sand og jordsmonn. Et nett av armeringsjern gir retningsavhengighet på linje med fibrene i et glassfiber- eller aramidlaminat. Betong er dermed ideelt som studieobjekt under etablering av kompetanse innenfor numeriske beregninger og materialtesting.

2.3 Beregningsmetoder for penetrasjon og dynamiske laster

Tradisjonelle metoder for å predikere inntrengning av prosjektiler i et målmaterial har i stor grad vært basert på kurvetilpasning til forsøksdata, eventuelt i kombinasjon med prinsipper fra grunnleggende fysikk. Et typisk eksempel er metoder som anvender "Cavity Expansion Theory" fra analytisk kontinuumsmekanikk.



Figur 2.2: (a) Empirisk / semianalytisk metode, (b) numerisk metode

Slike metoder kan gi svært gode resultater dersom databasen som ligger til grunn er av høy kvalitet og av tilstrekkelig omfang. De gir imidlertid lite rom for å generalisere og ekstrapolere resultatene, særlig med hensyn på komplekse målgeometrier eller sammensatte mål. De er også, med noen unntak, begrenset til beskrivelse av udeformerte penetratorer eller rent hydrodynamiske problemer (hulladninger).

Utviklingen av numeriske verktøy og stadig raskere datamaskiner setter oss i stand til å analysere penetrasjonsprosessen grundigere enn tidligere. En hovedklasse av modeller går under betegnelsen hydrokoder eller "wave propagation codes" fordi de har sitt opphav fra fluidmekanikken. "Dynamic Finite Element Methods" brukes også, og disse er basert på generaliserte metoder fra strukturmekanikk. I praksis er det i dag en flytende overgang mellom disse to klassene av programmer, da de i enkelte tilfeller kan vises å være matematisk identiske. Ved FFI er hydrokoden Autodyn inntil videre valgt som standardverktøy.

Figur 2.2 (b) viser skjematisk de viktigste komponentene i en numerisk løsningsmetode for et dynamisk problem. Både de testene man utfører på materialet, den modellen dette datasettet skal understøtte, såvel som selve den numeriske metoden vil bidra med unøyaktigheter i det endelige svaret. Brukerens kunnskap og erfaring vil også spille en vesentlig rolle, spesielt for komplekse materialmodeller. Man kan derfor ikke ha tillit til resultater fra hydrokodeberegn-

inger før man har kartlagt hydrokodenes muligheter og begrensninger gjennom omfattende validering mot forsøk og grunnleggende fysiske modeller.

Numeriske metoder utmerker seg imidlertid gjennom sin fleksibilitet med hensyn på hvilke problemer som kan formuleres, som ved komplekse målgeometrier eller sammensatte mål. Dessuten vil beregningsverktøyet selv utgjøre et virtuelt laboratorium, hvor man i detalj kan studere bølgeforplantning gjennom materialet og følge materialets fullstendige tilstand i ethvert tidspunkt. Verdien av dette kan vanskelig overvurderes.

3 KONKRETE MÅL FOR ARBEIDET

Prosjektets konkrete arbeidsmål har vært direkte knyttet til de elementer som må beherskes for å gjennomføre og validere hydrokodeberegninger for penetrasjonsfysikk:

- Fremskaffe materialdata for relevante materialer
- Skaffe eller formulere adekvate materialmodeller
- Validere hydrokodeberegninger mot relevante skyteforsøk
- Vurdere hydrokoderesultatene mot fysiske forståelse og matematiske modeller av penetrasjonsprosessens fysikk

Aktiviteten har vært organisert i følgende delprosjekter:

DP1: Materialkarakterisering av betong og fjell

DP2: Skyteforsøk og simuleringer av KE-våpens penetrasjon

DP3: Bygging av instrumentert kanon

DP4: Materialdatabase for fjell

Prosjektets resultater er dokumentert gjennom 39 rapporter og publikasjoner, se referanselisten. I de følgende kapitler er hovedresultater fra de ulike delprosjektene beskrevet på overfladisk, men teknisk nivå. Til sist følger en oppsummering og hovedkonklusjoner.

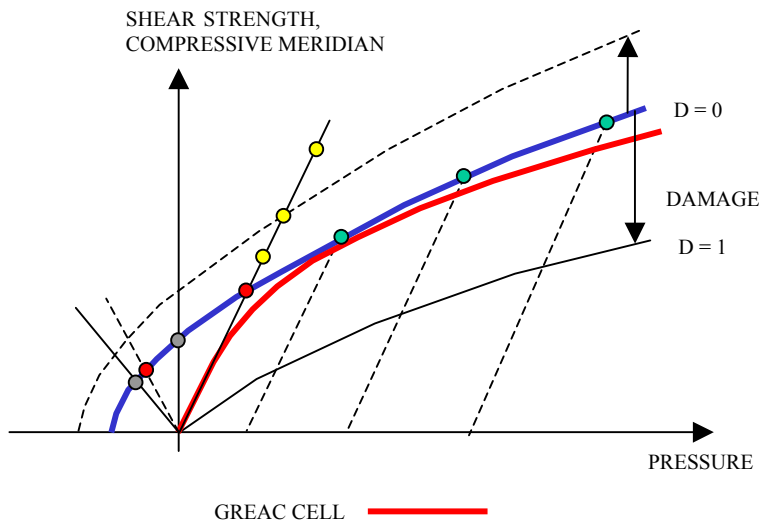
4 DP1: MATERIALKARAKTERISERING AV BETONG OG FJELL

4.1 Generelt

For å kunne gjøre realistiske simuleringer er man avhengig av gode materialmodeller, dvs. en god matematisk beskrivelse av de involverte materialene. En materialmodell beskriver hvordan materialet deformeres og forandrer egenskaper under belastning – i ulike situasjoner kan materialet oppføre seg elastisk, plastisk, "sprøtt" osv. En god oversikt over materialoppførselen for betong er gitt i (Riedel). Materialmodeller er også kort omtalt i kapittel 5 om simuleringer.

I tillegg til dette matematiske rammeverket trenger man også representative verdier for de forskjellige numeriske parameterne som inngår i materialmodellen. Det må da gjennomføres laboratorietester av de relevante materialene. Enkelt sagt påfører man en nøyte definert last, og måler hvordan materialet responderer. Slike tester kan klassifiseres i to grupper: kvasistatiske og dynamiske tester.

For å få en oversikt over aktuelle testmetoder ble det gjennomført en litteraturstudie (39) av materialtesting. Lesere som har interesse av en gjennomgang av teorien bak forskjellige kvasistatiske og dynamiske tester, henvises til denne rapporten, samt (5). I dette kapitlet gjengis bare hovedpunktene.



Figur 4.1: Oversikt over data for flytekurve som kan oppnås med forskjellige testmetoder

Flytekurven beskriver de tilstander i hovedspenningsrommet hvor materialet utviser sin maksimale skjærstyrke. Figur 4.1 illustrerer hvilke datapunkter for flytekurven (også kalt sviktkurve) som kan oppnås med forskjellige testmetoder:

- Røde datapunkter: Standard en-aksiell kompresjons- og strekktest
- Grønne datapunkter: Tri-aksiell kompresjonsstyrke målt f.eks. med en HOEK-celle
- Rød kurve: Målinger med en GREAC-celle
- Gule datapunkter: Tøyningsrateavhengig enaksiell spenning – Split Hopkinson Bar
- Blå kurve: Materialets faktiske kvasistatiske flytekurve

Avanserte hydrokode-materialmodeller for betong vil måtte inkludere tøyningsrate-effekter (økt styrke) og beskrivelse av skadeutvikling ("Damage", D , redusert styrke). Det er imidlertid kontroversielt i hvor stor grad tøyningsraten innvirker på skjærstyrken under generelle betingelser. Det finnes ingen allment akseptert teori, og målinger kan bare gi enkelt-tilstander under særskilte betingelser. Dette gjelder i ennå større grad for skadeutvikling, da det er uklart både hvordan D skal modelleres på en god måte og hvordan flytegrensen og andre parametere avhenger av D . Gode beskrivelser og data for tøyningsrateeffekter og skadeutvikling er derfor i stor grad utilgjengelig.

Materialets tilstandsligning (Equation of State – EOS) inngår vanligvis som en separat del av materialbeskrivelsen i hydrokoder. EOS beskriver trykk som funksjon av kompresjon (eller alternativt sjokkhastighet som funksjon av partikkelhastighet). Tøyningsrate-avhengighet vil også finnes i tilstandsligningen. Sjokkeksperimenter som for eksempel Flyer Plate Impact kan brukes til å generere slike data. Det er imidlertid få modeller som inneholder dette. I stedet utnytter man at tøyningsrate i praktiske sammenhenger vil være korrelert med trykket. Man kan derfor legge inn "korrekt" tøyningsrate-korreksjon som funksjon av trykk for det aktuelle problemet. I de følgende delkapitler beskrives aktuelle testmetoder i litt større detalj.

4.2 Kvasistatisk materialtesting

4.2.1 Standardiserte tester

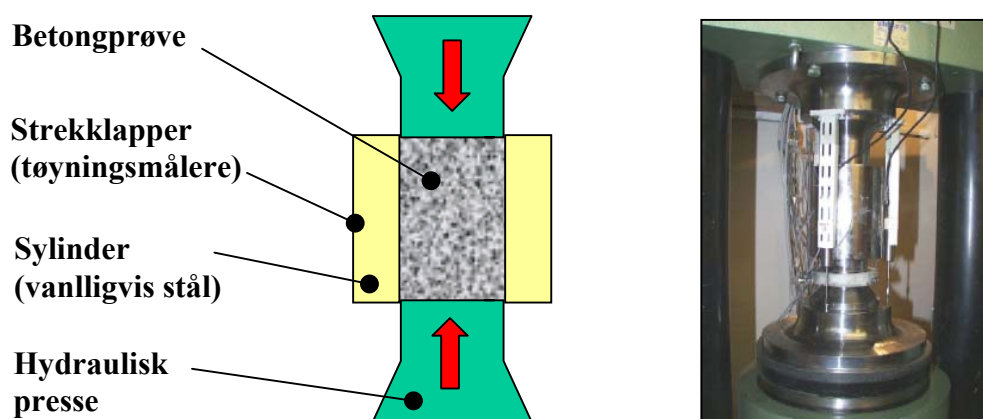
Med standardiserte tester mener vi tester som brukes innen "engineering" for å klassifisere og kvalitetsteste herdet betong for bygningsformål. Dette er stort sett snakk om kompresjon av kuber eller sylindere til brudd, samt direkte eller indirekte tester av strekkstyrke. Felles for dem er at de ikke er ment å teste materialens egenskaper slik de må angis i en avansert beregningsmodell, men er snarere utformet for å ha standardiserte måter for klassifisering. Det gis en god gjennomgang av slike metoder i (6) og (27).

En kompresjonstest er naturligvis relevant for holdfastheten til en bropillar, men i enhver konstruksjon oppstår det kompliserte tri-aksielle spenningstilstander. En-aksiell styrke vil likevel kunne brukes som en relevant parameter i empiriske beregningsverktøy, siden det er en entydig, men ukjent korrelasjon mellom enaksielle og triaksielle egenskaper.

FFI har utstyr for å gjennomføre standard enaksielle tester, men det er vurdert som mer kosteffektivt å utføre dette eksternt.

4.2.2 Gauged Reactive Confinement / GREAC-celle

I løpet av Prosjekt 766 er det bygget opp en såkalt GREAC (Gauged REActive Confinement) celle for kvasistatisk triaksial kompresjonstesting under trykk opp mot 1.0 GPa, samt programvare for prosessering av data. Utstyret er det eneste i Norge, og sannsynligvis i Norden. Tilsvarende utstyr finnes ved Imperial College (IC) i London, UK, som FFI indirekte har samarbeidet med i prosjektet ANNC III-16 - Penetration into Concrete. Utstyret er vist i Figur 4.2. En teknisk beskrivelse kan finnes i (27).



Figur 4.2: Skjematisk skisse av en GREAC-celle (venstre) og foto av installasjonen ved FFI (høyre)

Ved en GREAC-test belaster man et sylindereformet prøvestykke som er omsluttet av en sylinder av stål eller et annet elastisk materiale. Ved FFI brukes stål eller wolfram. Når prøven komprimeres vil den søke å utvide seg i radiell retning på grunn av Poisson-effekten. Det dannes da en spenning mot stålsylinderen, som reagerer med å utvide seg periferisk (i angulær retning), samtidig som den krymper litt i sin lengderetning.

Sylinderen "flyter" relativt til prøvestykket, ved at friksjonen er minimalisert så mye som mulig. Under testen måles tilstanden til både testmaskinen (stempelposisjoner og kraft) og sylinderen

(tøyninger på dens utside, både periferisk og i lengderetning). Ved å benytte en matematisk modell for sylindere sammen med et sett antagelser, kan tilstanden av spenning og tøyning i selve prøvestykket beregnes.

Det er helt sentralt at prøvestykkene holder svært nøyaktige dimensjoner, men dette må blant annet avveies mot monterings hensyn. Ved FFI støpes prøvene i presisjonsformer med bunn og åpen topp. Toppflaten på prøvestykket planslipes med spesielt roterende verktøy hos Norges Byggeforskningsinstitutt. Klaringen mellom prøven og stålsylindere før testen starter er typisk 0.2 mm, noe som muliggjør montering av oppsettet. Molybdenfett er eneste smøremiddel – det brukes ikke plastmembraner eller lignende. Eksempler på betongprøver før og etter testing er vist i Figur 4.3.



Figur 4.3: Betongprøver før og etter testing. Den svarte overflaten er molybdenfett som har fått en grafittlignende struktur under testen.

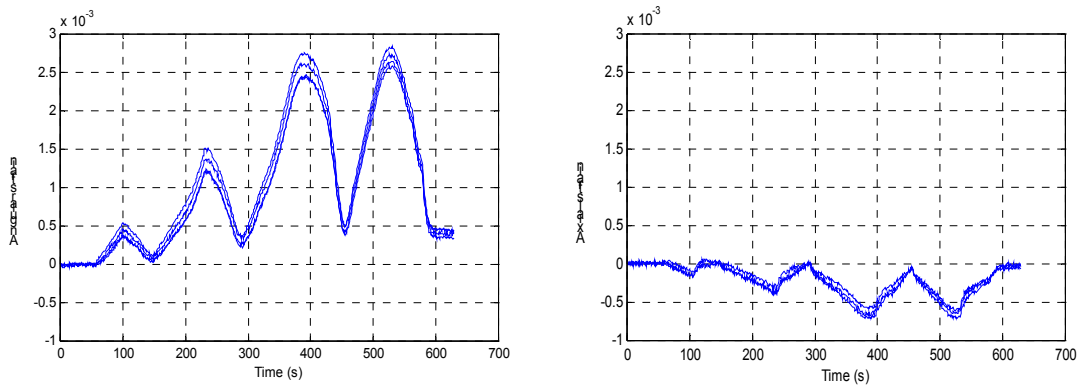
(1)	Measurements of axial force, axial compression of the specimen and the strains on the outside of the steel cylinder	<i>GREAC test</i>
(2)	Calculation of the radial stresses and strains on the inside of the steel cylinder by using a mathematical model of the cylinder	<i>Initial Data reduction</i>
(3)	Calculation of pressure, density and von Mises stress for input to a strength model and equation of state in a hydrocode	<i>Hydrocode data</i>

Figur 4.4: Hovedskrittene i overgang fra rådata til hydrokodedata

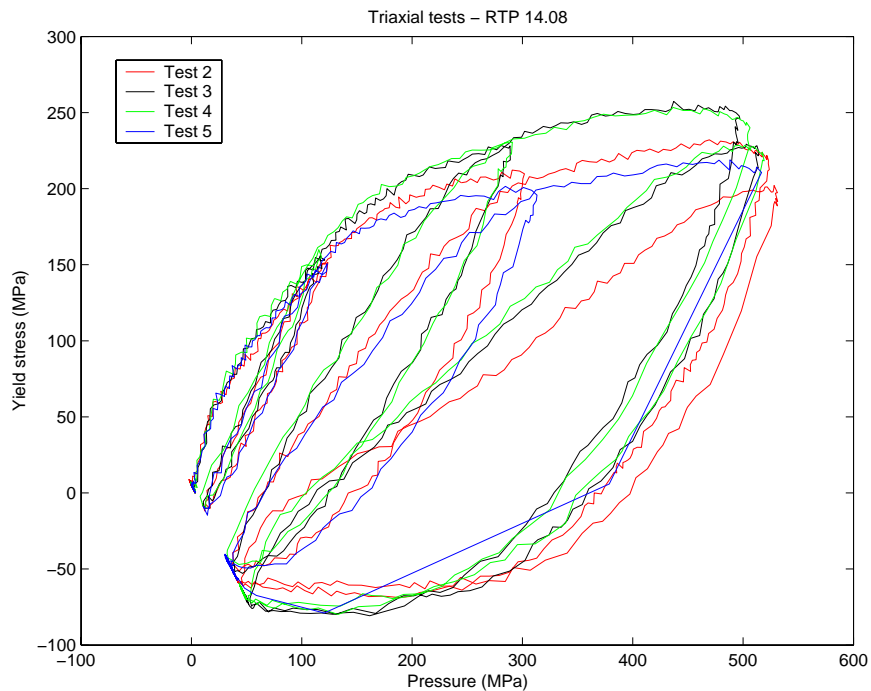
I Figur 4.4 vises alle trinnene i prosessen med å generere hydrokodedata for et gitt materiale. Trinn 2 i oversikten kan gjøres analytisk ved hjelp av elastisitetsteori. De aktuelle formlene er utledet i (39). I prosjektet er det også utviklet en spesiell FEM-kode for mer nøyaktige beregninger (11). Trinn 3 illustreres i Figur 4.5-4.6.

Førstnevnte viser rådata som funksjon av tid for forskjellige (men identiske) prøver. Forskjellene skyldes primært betongens stokastiske egenskaper; målinger på "kontinuums-

materialer" viser ingen signifikant spredning. I Figur 4.6 er disse kombinert til å finne sammenheng mellom von Mises-spenning og trykk, slik at den trykkavhengige flytegrensen fremkommer. For å bestemme tøyingsrateavhengige effekter må imidlertid dynamiske metoder (Split Hopkinson Bar) benyttes, jfr Figur 4.1.



Figur 4.5: Rådata for tøyning for et utvalg betongprøver under en GREAC-test



Figur 4.6: Eksempel på hydrokode-data for flytekurve (skjærstyrke) generert fra rådata for et utvalg prøvestykker

På tilsvarende måte kan man finne tilstandsligningen ved å plote trykket som funksjon av tetthet. Merk imidlertid at det er svært store tøyingsrateavhengigheter i EOS, slik det kommenteres i Kapitlene 4.3.2 og 5.1.2.

Til slutt nevnes at ved å laste og avlaste betongprøven flere ganger til maksimalt spenningsnivå under testen, kan elastiske parametre (G og K) bestemmes. G er proporsjonal med stigningstallet under av- og pålastning i Figur 4.6, mens K følger tilsvarende fra tilstandsligningen.

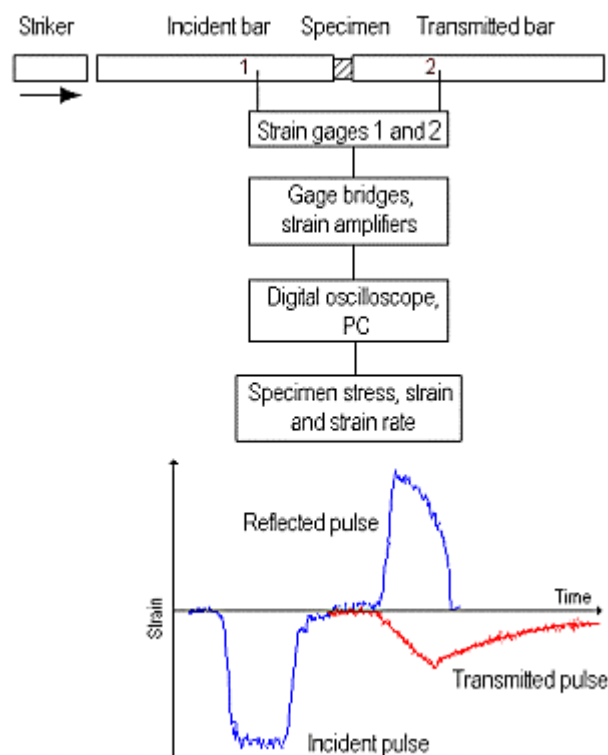
4.2.3 HOEK-celle

Den store fordelen med en GREAC-test er at en enkelt test gir et estimat for hele den trykkavhengige kurven for flytestyrke. Betongen befinner seg imidlertid på flytegrensen under store deler av belastningen. Dette medfører skadeutvikling ("damage", heretter D) slik at flytegrensen vil reduseres som funksjon av tid. Siden man ikke kan måle D direkte, har man ikke god kontroll over hvor raskt/langsomt den reduseres.

En mer avansert test som unngår dette problemet er den såkalte HOEK-cellen. Her kontrolleres den radielle spenningen aktivt ved hydraulisk trykk og en spesiell membran. Man kan dermed laste opp hydrostatisk, og så gå ut i en skjætilstand – jfr Figur 4.1. Ulempen med en HOEK-celle er at den bare kan gi et eneste punkt på flytekurven for hver betongprøve. Dette skyldes at oppsettet ikke er stabilt nok til å hindre global kollaps når sviktspenningen nås. Metoden krever også svært stabile og kostbare hydrauliske presser.

4.3 Dynamisk materialtesting

Dynamiske tester kan brukes både til å finne hvordan materialets egenskaper avhenger av tøyingsraten og til å teste materialene under høyere spenninger enn hva som er mulig med statiske tester. De to mest aktuelle dynamiske materialtestene er Split Hopkinson Bar (SHB) og Flyer Plate Impact.



Figur 4.8: Skjematisert fremstilling av en Split Hopkinson Bar for måling av dynamisk kompresjonsstyrke under en-aksiell spenning (Figur: Tampere University of Technology, Finland)

4.3.1 Split Hopkinson Bar

En prinsippsskisse av en Split Hopkinson Bar er vist i i Figur 4.8. I en SHB-test sendes en spenningspuls gjennom den venstre ”reflektor”-staven. Pulsen genereres som regel ved å skyte en "striker" mot staven. Noe av pulsen reflekteres ved overflaten til prøvestykket, mens noe slipper gjennom. Tilsvarende vil noe av pulsen (eller hele pulsen dersom prøvestykket er plastisk) transmitteres til den høyre staven.

Det er vesentlig at stavene er lange i forhold til spennings-pulsen, mens prøvestykket er kortere enn spenningspulsen. Ved riktig valg av geometriske dimensjoner vil en avlastningsbølge rekke å propagere fra overflaten av prøvestykket og inn til aksen, slik at man oppnår enaksiell spenning i prøvestykket inntil svikt oppstår.

Ved å la sensorer måle tøyningen i begge stavene, kan man beregne sammenhengen mellom spenning og tøyning i prøvestykket som funksjon av tiden, og deretter komme frem til spenning som funksjon av tøyning. Ved å sammenligne med resultater fra statiske tester får man deretter tøyningstøyningsrateavhengigheten til materialet i enaksiell spenning. SHB-testen gir imidlertid bare et punkt på flytekurven om gangen. For å skaffe flere punkter må man variere amplituden på den innkommende spenningspuls.

Maksimalt oppnåelig tøyningstøyningsrate avhenger blant annet av størrelsen på prøvestykket og amplituden på den innkommende spenningspuls. Maksimal amplituden er begrenset av materialet i metallstavene som prøvestykket er spent opp mellom – man må holde seg innenfor det elastiske området, altså under flytegrensen. For meget små metalliske prøvestykker har man oppnådd tøyningstøyningsrater på 10000/s, men siden betong er et høyst inhomogent materiale må prøvestykkene ha en viss minstestørrelse slik at maksimal tøyningstøyningsrate reduseres.

Det finnes mange variasjoner av SHB-testen, blant annet for å måle dynamisk strekkstyrke. Detaljer kan finnes i (39), samt i den rike standardlitteraturen som finnes på området.

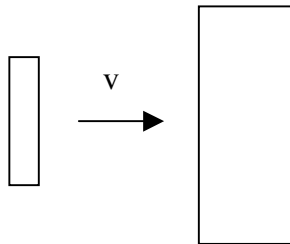
4.3.2 Flyer Plate Impact

Under en Flyer Plate Impact-test skyter man en plate eller et flat-neset prosjektil med kjente materialeegenskaper mot et skiveformet prøvestykke. Dette er illustrert i Figur 4.9. Testen ligner på en SHB-test, men i dette tilfellet er vi interessert i hva som skjer under den første sjokkbelastningen, ikke etter at spenningstilstanden har stabilisert seg som ved en SHB. Testen foregår derfor under enaksiell tøyning, ikke enaksiell spenning. Ved å måle partikkelhastigheten på baksiden av prøvestykket med et laserinterferometer kan trykket i anslagsflaten beregnes ved bruk av standard sjokkfysikk. Flere slike eksperimenter gir ulike punkter for EOS under sjokkbetingelser.

Det finnes mange variasjoner av Flyer Plate-testen, men generelt vil alltid en plate skytes mot en annen plate. Siden bredden av platene er vesentlig større enn tykkelsen (helt motsatt av SHB-testen), vil altså materialet nær midten av platen befinne seg i en tilstand av enaksial tøyning, helt til avlastningsbølger har beveget seg inn fra ytterkanten og avlastet materialet.

Flyer Plate testen kan også brukes til å bestemme den dynamiske strekkstyrken til materialet, men hovedanvendelsen for betong er å bestemme tilstandsligningen. Man bruker da vanligvis

et noe annerledes oppsett, hvor prøvestykket brukes som prosjektil. Ved denne inverse testen kan man imidlertid ikke oppnå veldig høye trykk. For å klare dette kan man bruke det opprinnelige oppsettet, men legge til en plate av kjent materiale bak prøvestykket. Teorien for å utlede EOS fra disse to testene er nærmere beskrevet i referansene (10,39).



Figur 4.9: Enkel prinsippskisse av en Flyer plate impact test.

Ved EMI har man utviklet en sofistikert, men kostnadskreven metode for å karakterisere de to komponentene av betong (tilslag og sement) separat gjennom Flyer Plate-tester, og deretter bruke numeriske simuleringer for å beregne "gjennomsnittlige" EOS på makronivå.

4.3.3 Dynamisk materialtesting i Prosjekt 766

I prosjektforslaget ble det forespeilet at man skulle bygge opp utstyr for å utføre Flyer Plate tester ved FFI. Det ble imidlertid tidlig klart at det ikke ville være forsvarlig å forsøke å gjennomføre dette med prosjektets økonomiske og personellmessige rammebetingelser. FFI har i utgangspunktet heller ikke noen laboratorier som egner seg til formålet. En mye mer kosteffektiv løsning er å samarbeide med etablerte laboratorier. På dette grunnlaget ble det inngått et uformelt samarbeid med EMI, som er ledende i verden på denne teknikken. Et formalisert samarbeid var en periode under oppstart, men ble av personellmessige årsaker ved FFI terminert.

I tillegg skulle det vurderes å bygge en "Split Hopkinson Bar". De samme argumenter gjorde seg gjeldende her, og det har derfor istedenfor vært prioritert å samarbeide med TNO (Nederland) om studier av og med denne teknikken. Dette har foregått gjennom ANNC III-16.

5 DP2: SKYTEFORSØK OG SIMULERINGER AV KE-VÅPENS PENETRASJON

5.1 Hydrokodeberegninger

5.1.1 Generelt

Numeriske simuleringer kan være et svært kraftig verktøy for å behandle penetrasjonsforløp og andre dynamiske fenomener. Mer kompliserte konfigurasjoner kan behandles sammenlignet med analytiske formler og empiriske uttrykk

Evaluering av numeriske simuleringer som et verktøy for å beregne penetrasjonsforløp har vært et hovedmål i prosjektet. Det er flere aspekter som påvirker resultatene fra en slik beregning:

- Materialdata,
- Materialmodell,
- Valg av numerisk metode,

- Brukerens formulering.

Spesielt vil den valgte materialmodellen og de nødvendige input-data kunne påvirke resultatene i stor grad. Her er det en vekselvirkning; en avansert modell vil ikke gi mer pålitelige resultater enn en enkel modell dersom de materialdata man har er utilstrekkelige. Det åpner tvert i mot for ikke-trivielle feil som kan være vanskelige å gjennomskue.

Gjennom prosjektet har det vært sentralt å utveksle informasjon og erfaringer med andre miljøer. På denne måten har man kunnet trekke erfaringer i langt større grad enn det som ville være mulig på egen hånd. Følgende koder og modeller har vært i bruk ved FFI eller hos samarbeidspartnere:

- MSC/DYTRAN med lineær EOS og Mohr Coulomb modell
- LS-DYNA 3D med Winfrith-modellen (#85)
- LS-DYNA 3D med tøyingsrate-avhengig Winfrith-modell (#84)
- AUTODYN 2D med Porous Mohr Coulomb (PMC) modell
- AUTODYN 2D med Mohr Coloumb / lineær EOS og "Cumulative Damage Model"
- LS-DYNA 3D med "K&C¹ model Version 1"
- AUTODYN 2D med "RHT² model" fra Ernst Mach Institute (EMI)

Ved FFI er AUTODYN valgt som hovedverktøy.

I den senere tid har man vurdert å se nærmere på den britiske koden ELFEN, som gir muligheten for automatisk, dynamisk regenerering av nettet i Lagrange-prosessoren. Dette muliggjør modellering av store deformasjoner uten å benytte numerisk erosjon, samt at modellen bare inneholder små celler der hvor beregningene krever det.

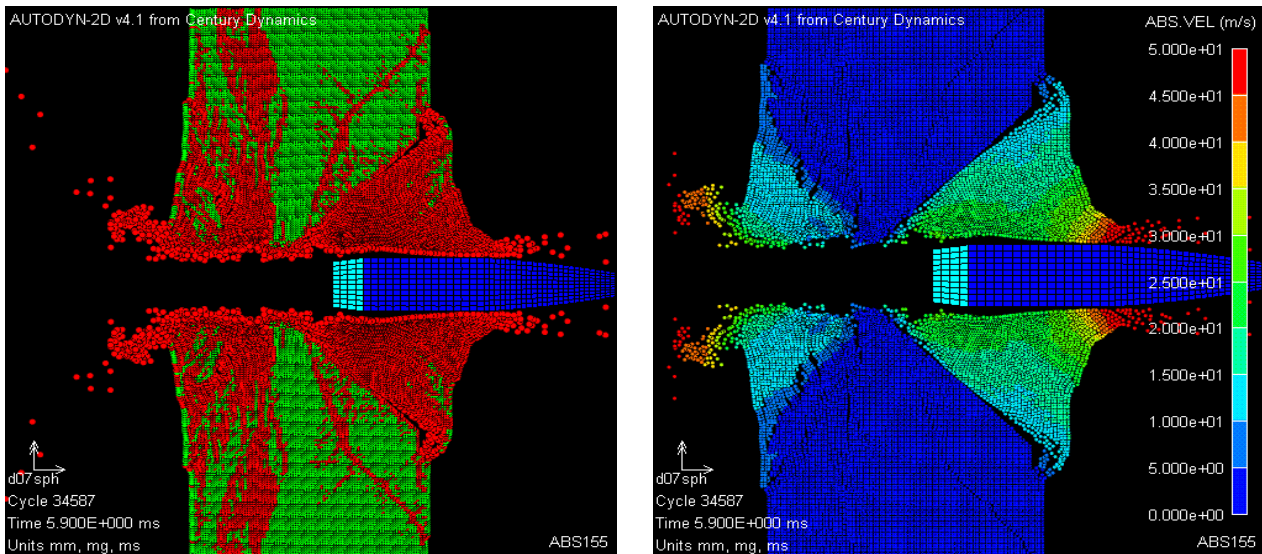
5.1.2 Hydrokoden AUTODYN

FFI anvender primært den kommersielle hydrokoden Autodyn (Figur 5.1) innenfor dette fagfeltet. Egne dataprosedyrer for materialbeskrivelse eller andre spesielle behov kan skrives og lenkes inn i koden. Autodyn utmerker seg på flere punkter: Programmet har et stort brukermiljø internasjonalt, det er en numerisk svært robust kode, og mulighetene for å kombinere forskjellige typer numeriske skjema (Euler, Lagrange, Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)) innenfor ett og samme problem er godt utviklet. På denne måten kan vekselvirkning mellom flere objekter og mellom faste stoffer og væske/gass beskrives. Autodyn har imidlertid ikke ekte dynamisk regenerering av Lagrange-grid. Eksempler på anvendelser er forplantning av trykkbølger i luft og vann, enklere strømningsproblemer i gassdynamikk, inntrengning av projektiler og detonasjonsforløp.

Autodyn kjøres ved FFI på en sentral Unix tjenermaskin med 8 prosessorer. Denne ble oppgradert i januar 2002. Nylig er det gjort mulig å kjøre parallelle prosesser med Autodyn. FFI har vært pilotbruker av nye versjoner, og pleier et tett samarbeid med produsenten.

¹ K&C: Karagozian & Case

² RHT: Riedel, Hiermaier, Thoma



Figur 5.1: Simulering av artillerigranat mot betongvegg med hydrokoden Autodyn. Venstre bilde viser strekkbrudd (rødt) i material-modellen, og man ser at det åpner seg fysiske sprekker i materialet. Høyre bilde viser lokal hastighet i målmaterialet, og indikerer klart området for "scabbing".

5.1.3 Materialmodeller

Betong er stokastisk granulært, mens fjell kan ha retningsavhengige materialegenskaper. Materialmodellene som anvendes i hydrokoder er imidlertid stort sett isotrope kontinuums-idealiseringer av det relevante materialet. Data som er input til slike modeller må derfor representere makroegenskapene til materialet. De fleste modeller er basert på plastisitetsteori samt en tilstandsligning (EOS, Equation of State) som beskriver volumetrisk oppførsel, inkludert irreversibel kompaktering. I de mest avanserte modellene er effekter som tøyingsrateavhengighet og skadeutvikling inkludert. I strekk bruker man en form for "smeared crack"-modell.

Den avanserte RHT materialmodellen fra EMI i Tyskland er blitt anvendt som prototyp gjennom prosjektet i lengre tid. Denne kan tilpasses til de fleste sprø materialer, som betong, fjell, glass og keramikk under de fleste aktuelle belastninger. Den anvendes av en rekke ledende miljøer internasjonalt. RHT er etterhvert også lagt inn som standardmodell i Autodyn av leverandøren. Modellen videreutvikles imidlertid stadig ved EMI, og mulige modifikasjoner identifiseres kontinuerlig.

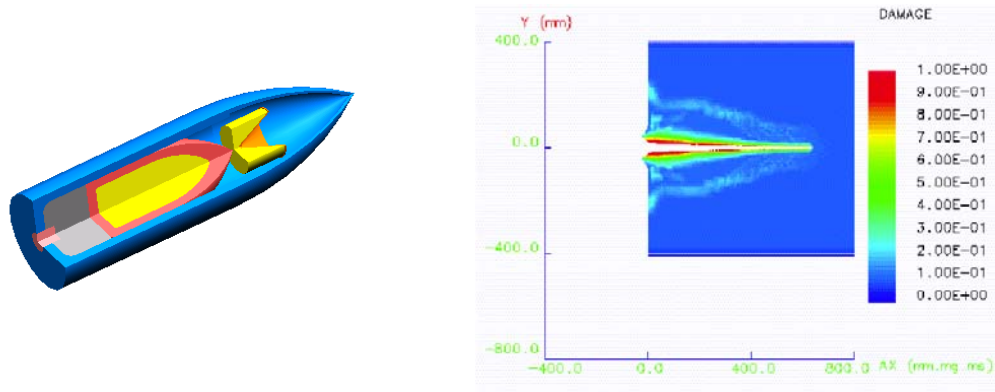
RHT er etablert som et av FFIs hovedverktøy innenfor beregninger på penetrasjon i betong. Sammen med K&C-modellen (version 3) i LS-DYNA som bl a benyttes på FOI i Sverige, er den ansett å være den fysiske mest korrekte modellen som er tilgjengelig.

5.1.4 Programmering og bruk av subrutiner i Autodyn

Autodyn gir brukeren mulighet til å implementere sine egne subrutiner. Ved hvert enkelt tidssteg har man tilgang til alle relevante fysiske variabler, og kan ved en "spesialsydd" rutine foreta beregninger på grunnlag av disse etter egne behov.

Dette gjør det for eksempel mulig å implementere egne skademodeller basert på egne kriterier.

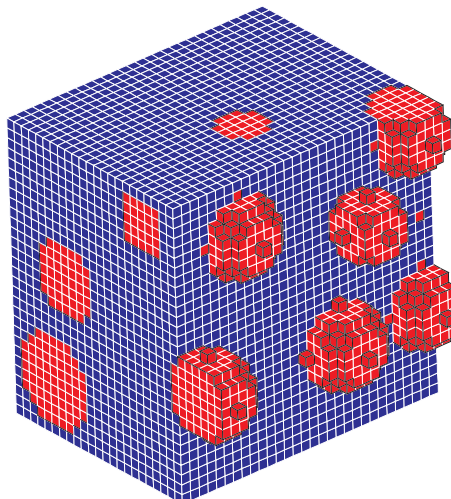
En sentral anvendelse av dette kan være å "prefabrikere" en sårkanal fra en hulladning i et tandemstridshode. Hulladningen gir nemlig ikke bare en "slank" penetrasjonskanal, men den vil også påføre et mål av betong eller fjell skade. Dette er illustrert i Figur 5.2.



Figur 5.2: *Prinsippskisse av tandemstridshode (FFI) og simulering av hulladningens virkning i betong (EMI). FFI har utviklet en subrutine som preparerer en kanal med radielt varierende skade. Hovedpenetratorens oppførsel kan deretter simuleres.*

Studier av grunnleggende dynamisk bruddmekanikk har også vært gjennomført. Det viser seg vanskelig å inkludere dette i numeriske koder, men en variant av Benz-Aspehaugs modell for statistisk initiering av sprekker er implementert i en SPH-modell (22,23). På grunn av manglende materialdata og ukjente metoder for å fremskaffe disse er modellen ennå ikke kommet til praktisk anvendelse. Arbeidet har likevel resultert i en god grunnleggende forståelse av hvor sofistikerte modeller det er tjenlig å anvende med dagens kunnskap.

FFI har videre utviklet en prosedyre for å modellere granulære materialer (9). Dette gjøres ved hjelp av en brukersubrutine som på bakgrunn av inputdata genererer to subgrid, slik at vi får et to-komponent materiale. Dette er illustrert i Figur 5.3.



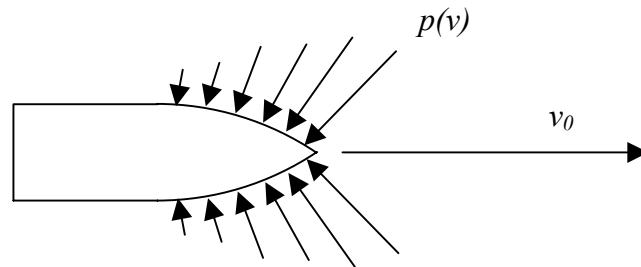
Figur 5.3: *To-komponent materiale modellert i hydrokoden Autodyn ved hjelp av FFI-utviklet subrutine*

Ved hjelp av et grafisk brukergrensesnitt kan brukeren definere størrelsen på "tilslaget" og det blir så stokastisk generert to subgrid. En alternativ metode benytter bare ett subgrid, men dette fylles med to forskjellige materialer. Med økende regnekraft vil disse opsjonene kunne være et nyttig supplement til kontinuums-beregninger. Flere detaljer kan finnes i (9).

5.2 Hybridberegninger – kombinasjon av numeriske og analytiske metoder

Vanlige 3D-simuleringer kan kreve betydelig CPU-tid, gjerne opp til flere uker. Dette er svært upraktisk dersom man ønsker å gjennomføre parameterstudier eller følsomhetsanalyser. Av den grunn benyttes ofte forenklete 2D-simuleringer dersom problemet har tilstrekkelig symmetri. I mange tilfeller er dette imidlertid ikke tilfelle.

På grunn av dette har man i prosjektet prioritert implementering av en hybridmetode som kombinerer bruk av numerikk og analytisk teori. Metoden er kjent fra litteraturen tidligere, og gjør det blant annet mulig å hurtig gjennomføre simuleringer av ikke-normalt anslag (8). Grunnideen er at prosjektilet modelleres i den numeriske koden, men at man anvender analytisk teori til å estimere kreftene på prosjektilet (Figur 5.4). Disse kreftene vil avhenge av den lokale overflatehastigheten. Dersom kreftene er riktig estimert vil prosjektilet bremses ned, deformeres og avbøyes akkurat som om det vekselvirket med et numerisk "subgrid" modellert i koden.

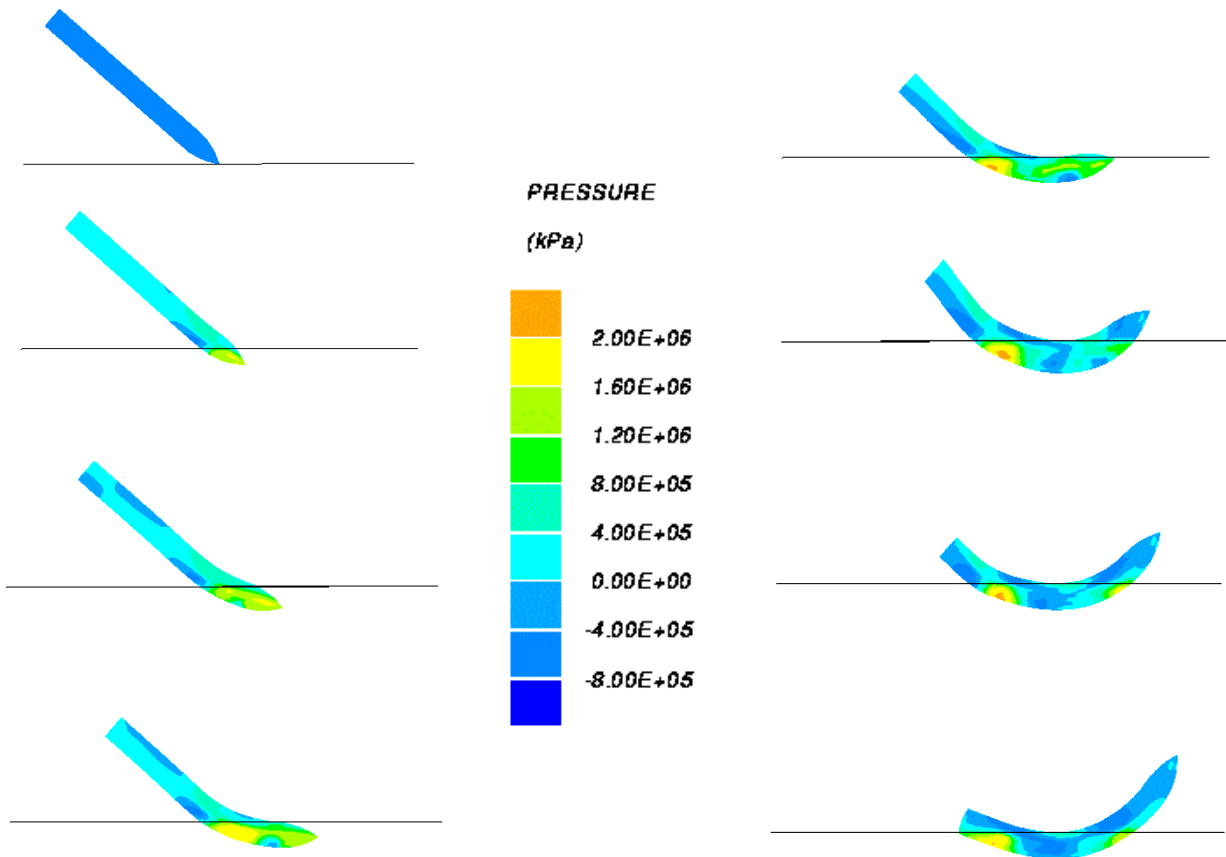


Figur 5.3: Illustrasjon av hybridberegning i penetrasjonsmekanikk – et analytisk uttrykk for kraft på prosjektilet brukes, og bare prosjektilets respons modelleres i Autodyn.

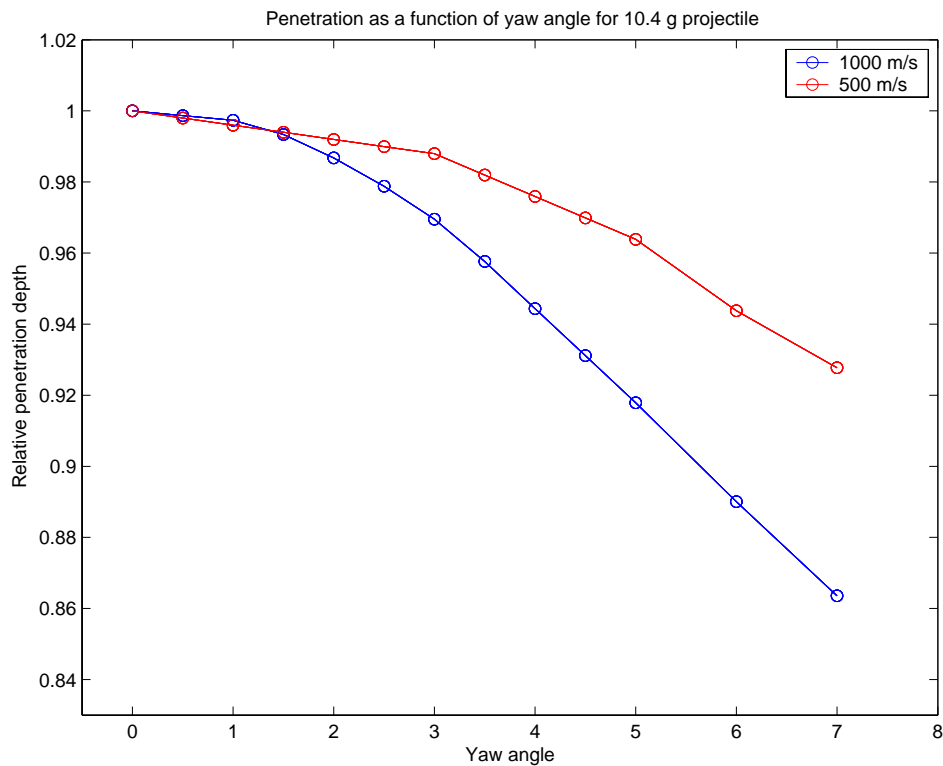
Dette kan være svært tidsbesparende dersom man primært er interessert i å studere responsen til prosjektilet under komplekse 3D-situasjoner, eller som innledende beregninger før en full simulering gjennomføres. Metoden gir naturlig nok ikke noen informasjon om kraterstørrelse, skade på målet etc.

For at resultatene skal gi god nøyaktighet er man avhengig av at de analytiske uttrykkene som benyttes gir en god approksimasjon til virkeligheten. I den nåværende implementasjonen har det blitt brukt uttrykk fra penetrasjon basert på Cavity Expansion Theory (CET). Dersom det utvikles en bedre analytisk teori, er det svært enkel å legge inn denne istedenfor de nåværende ligningene.

Figur 5.4 viser simulering med skrått anslag av stålprosjektil i aluminium. Resultatene stemmer godt overens med eksperimentelle forsøk (8). Metoden har videre blitt brukt til parameterstudier av anslag med yaw (43,44). Et eksempel på dette er illustrert i Figur 5.5.



Figur 5.4: Eksempel på simulering med hybridmetode. Prosjektilet, som i dette tilfellet har kaliber 7.11 mm, treffer målet skrått med hastighet 802 m/s og vi får rikosjett som resultat.



Figur 5.5: Parameterstudie av anslag med yaw for 7.11 mm prosjektil med masse 10.4 g.

5.3 Metoder basert på analytisk teori

Det er velkjent at metoder basert på analytisk teori er uunnværlige for å gjøre raske overslag, samt som referanseberegninger. De skal imidlertid heller ikke avskrives som seriøse beregningsverktøy. I det tidligere prosjekt 708 ble det etter inngående studier (14,16, 30, 34) konkludert med at ulike empiriske formler for penetrasjon i betong gav svært forskjellige resultater. Forrestals formel pekte seg ut som den mest lovende, og det videre arbeidet i Prosjekt 766 har i hovedsak vært basert på denne. Generaliseringer er gjort for å kunne dekke følgende situasjoner:

- Ulike betongkvaliteter,
- Forskjellige prosjektilgeometrier
- Mål med initiell penetrasjonkanal (etter anslag av hulladning)
- Beregninger som inkluderer randeffekter
- Beregning av resthastighet etter perforasjon

I det følgende beskrives utvidelsene noe mer detaljert. Det viser seg hensiktsmessig å uttrykke formlene ved hjelp av dimensjonsløse størrelser:

$$X = \frac{x}{d} \quad V = \sqrt{\frac{m}{d^3 \sigma_c}} v \quad M = \frac{m}{d^3 \rho_t} \quad N = g(\frac{v}{d})$$

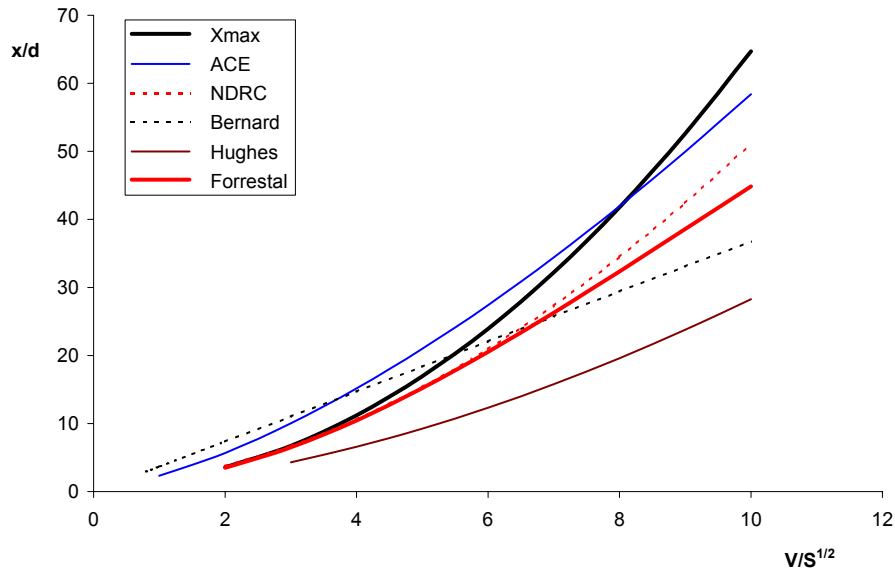
For matematiske uttrykk henvises det til variabel-listen i Appendix A.

5.3.1 Oppsummering av alternative empiriske formler

I Figur 5.6 har vi sammenlignet resultater fra ulike empiriske formler for anslag av en GBU-28 i normalbetong. Som nevnt er det stort avvik mellom formlene. Forrestals formel er imidlertid ansett som den mest lovende i og med at den er dimensjonsmessig riktig og basert på fysiske prinsipper. Mye av det analytiske arbeidet i P766 har derfor tatt i utgangspunkt i dette uttrykket.

Metoden er basert på såkalt Cavity expansion teori (CET), hvilket betyr at spenningen som oppstår ved ekspansjon av et hulrom (som kan beregnes eksakt for enkelte materialmodeller) brukes til å estimere kreftene på et prosjektil som trenger inn i samme materialet. Siden prosjektilet antas udeformert, kan man beregne en total kraft ved å integrerer spenningene over prosjektiloverflaten. Newtons 2. lov kan deretter brukes til å beregne nedbremsingen av prosjektilet. Dette gir en endelig penetrasjonsdybde som følger:

$$\frac{x}{d} = \frac{2}{\pi} \frac{M}{N} \ln \left[\frac{\frac{M}{N} + \frac{V^2}{S}}{\frac{\pi}{2} + \frac{M}{N}} \right] + 2,$$

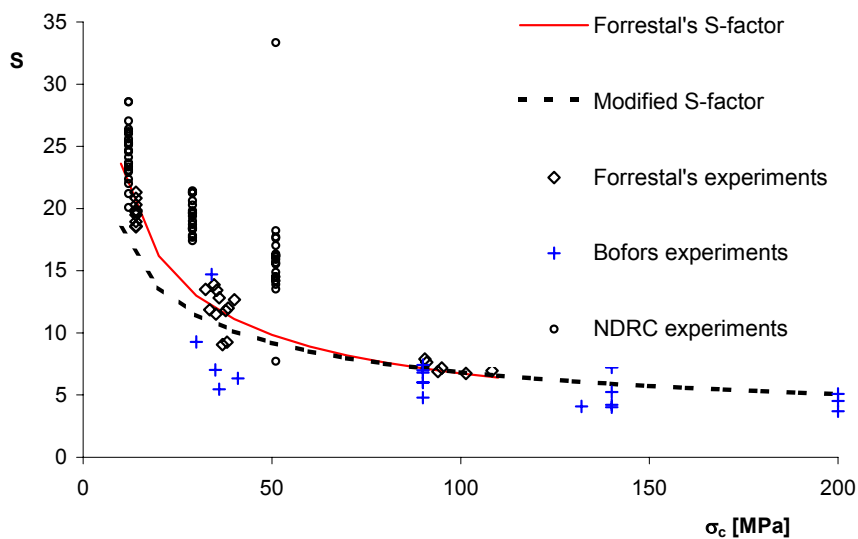


Figur 5.6: Beregninger av penetrasjonsevnene for en GBU-28 i normal konstruksjonsbetong ved bruk av ulike empiriske formler.

Betongens ”motstandskraft” som funksjon av kompresjonsstyrken er gitt gjennom den såkalte S-faktoren. I Forrestals opprinnelige formel var S-faktoren kalibrert til eksperimenter for betong opp til 100 MPa. FFI har imidlertid gjennomført forsøk med penetrasjon i betong med fasthet opp til 250 MPa. Den nye S-faktoren blir etter dette:

$$S = 49.5 \left(\frac{\sigma_c}{10^6} \right)^{-0.43}$$

Den modifiserte S-faktoren er illustrert i Figur 5.7. Eksperimentene er også plottet inn. I (13) er formelen sammenlignet med en rekke eksperimentelle data, inkludert FFIs egne forsøk, og overensstemmelsen viser seg å være akseptabel i de fleste tilfeller.



Figur 5.7: Sammenligning av original og modifisert S-faktor.

5.3.2 Forrestals formel generalisert til ulike prosjektilgeometrier

Forrestals opprinnelige formel gjelder kun for ogivale prosjektiler. I P766 er formelen utvidet til å gjelde for en større klasse prosjektilgeometrier. For eksempel har man sett på prosjektiler med såkalt "avkappet nese" og laget følgende mer generelle formel:

$$X_p = \frac{2}{\pi} \frac{M}{N} \ln \left[\frac{\left[1 - \frac{\pi R^2}{4M} X_1 \right] \frac{V_0^2}{S} + \frac{M}{N} - \frac{\pi R^2}{4} X_1}{\frac{M}{N} + \frac{\pi R^2}{4} X_1} \right] + X_1$$

$$N = \begin{cases} N_0 + R^2 \left[\frac{6(2\psi - 1)^2 + 8R(2\psi - 1) + 3R^2}{24\psi^2} \right] & \text{(ogival neseform)} \\ 1 - \left[\frac{1 - R^4}{8\psi^2} \right] & \text{(butt neseform)} \end{cases}$$

Vi merker oss at i spesialtilfellet $R = 0$ og $X_l = 2$ reduseres uttrykket til det opprinnelige. Det er et begrenset utvalg eksperimenter å sammenligne med, men for de eksperimentene vi har er overensstemmelsen god. Se (31,32) for flere detaljer.

5.3.3 Beregning av virkningen fra tandemladninger

En teknikk som kan benyttes for å øke gjennomslagsevnen til et moderne stridshode er å la en primær hulladning skape en "styrekanal" som gjør det enklere for hovedpenetratoren å trenge inn i målet. Som en første tilnærming til dette problemet kan analytisk teori modifiseres ved å inkludere en initiell sylindrisk kanal i målet. Kraften på prosjektilet blir følgelig modifisert, og de resulterende uttrykkene blir av følgende form (37,38):

$$x_1 = \frac{m}{2\beta} \ln \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} v_1^2 \right)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} d^2 (1 - R^2) \quad \beta = \frac{\pi d^2 B}{96\psi^2} \left((8\psi - 1) - R^2 (6(4\psi - 1) + 8R(1 - 2\psi) - 3R^2) \right)$$

$$A = S\sigma_c \quad S = 49.5 \left(\frac{\sigma_c}{10^6} \right)^{-0.43} \quad B = \rho$$

$$X = \frac{x_1(R) + x_{mit}(R)}{x_1(R=0)}$$

5.3.4 Randeffekter ved endelig målstørrelse

Formlene som er gjengitt i tidligere kapitler gjelder i prinsippet bare for såkalte halvuendelige mål, eller dersom målet har tilstrekkelig romlig utstrekning til at penetrasjonsprosessen ikke påvirkes av randeffekter. Det er derfor viktig å studere fenomenet randeffekter siden disse kan ha stor innvirkning. Videre er det av økonomiske årsaker ved gjennomføring av eksperimenter, ønskelig å gjøre målstørrelsen så liten som mulig,

Randeffektene kan påvirke penetrasjonsprosessen på forskjellige måter:

- Betong er mye svakere i strekk enn trykk. Når kompresjonsbølger reflekteres som strekkbølger fra baksiden av målet oppstår ”scabbing”. Et krater (riktignok fylt med den løsrevne betongen) dannes på baksiden av målet før prosjektilet når frem, slik at den effektive måltykkelsen blir redusert.
- Trykkbølger reflekteres som strekkbølger på randen og overlager trykkbølgene på prosjektilet når de kommer tilbake, slik at spenningen på prosjektiloverflaten reduseres.
- Dersom den ”plastiske” sonen rundt prosjektilet blir så stor at den når ut til randen av målet, vil det ikke være noe som ”holder igjen” målmaterialet fra å ”flyte vekk” og målet blir fullstendig ustabil. Treghetskraftene dominerer da prosessen.

I prosjektet har det blitt gjennomført flere forsøksserier for å finne den minste målstørrelse for at målet skal kunne betraktes som halvuendelig under et veldesignet eksperiment. Forsøkene er sammenholdt med Autodyn-simuleringer, se (17,33) for flere detaljer. I de fleste tilfeller vil målet kunne regnes som halvuendelig dersom forholdet mellom mål- og prosjektildiameter er minst 15.

I tillegg er det utviklet en analytisk modell for beregning av randeffekter basert på Forrestals formel. En reduksjonsfaktor er inkludert for å redusere kraften på prosjektilet som funksjon av størrelsen på målet. Forholdet mellom spenningen som fremkommer i CET-problemet for et endelig og uendelig materiale inngår. Dette kan imidlertid bare beregnes eksakt for de enkleste materialmodellene, men det antas at vesentlige deler av materialavhengigheten kanselleres, slik at uttrykk utledet for en enkel modell også kan brukes for mer kompliserte modeller.

For et elastisk-plastisk materiale har vi for sfærisk CET:

$$\alpha_t = \frac{1 - \left(\frac{d_{ep}}{d_t}\right) + \ln \left\{ \left(\frac{d_{ep}}{d_t}\right)^3 \right\} + \ln \left\{ \left(\frac{d_t}{d}\right)^3 \right\}}{1 + \ln \left(\frac{2G}{Y} \right)}$$

$$\left(\frac{d_{ep}}{d_t}\right)^3 = \frac{1}{4} \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \left(\sqrt{1 + \frac{16G}{Y} \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \left(\frac{d}{d_t}\right)^3} - 1 \right)$$

Det er imidlertid også utledet et uttrykk for reduksjonsfaktoren dersom materialet kan beskrives ved en Mohr-Coulomb modell, noe som er typisk for betong. Utstøtning og oppsprekking er imidlertid ikke tatt hensyn til i noen analytisk modell. Se (18,19) for flere detaljer.

I forbindelse med randeffekter ble det også gjennomført en studie (7) av anslag mot såkalte modulære mål. Dette er mål som er bygget av ”klosser” som er satt inntil hverandre. Det ble funnet at det var viktig at sprekken mellom klossene var så liten mulig, for å unngå økning av

penetrasjonsdybden.

5.3.5 Perforasjon (gjennomslag)

Formalismen som ble utviklet i forbindelse med randeffekter kan også brukes til beregning av perforasjon. Ved å erstatte parameteren for måldiameter med avstand til baksiden av målet, fås en reduksjonsformel som avhenger av avstanden til baksiden. Denne reduksjonsfaktoren kommer i tillegg til eventuell effekt fra randen av målet. Det generelle uttrykket kan skrives:

$$V_{bl} = \sqrt{S \frac{M}{N} \left[\frac{1}{1-\kappa} \exp \left\{ \frac{\pi N}{2 M} I(X_N, H) \right\} - 1 \right]}$$

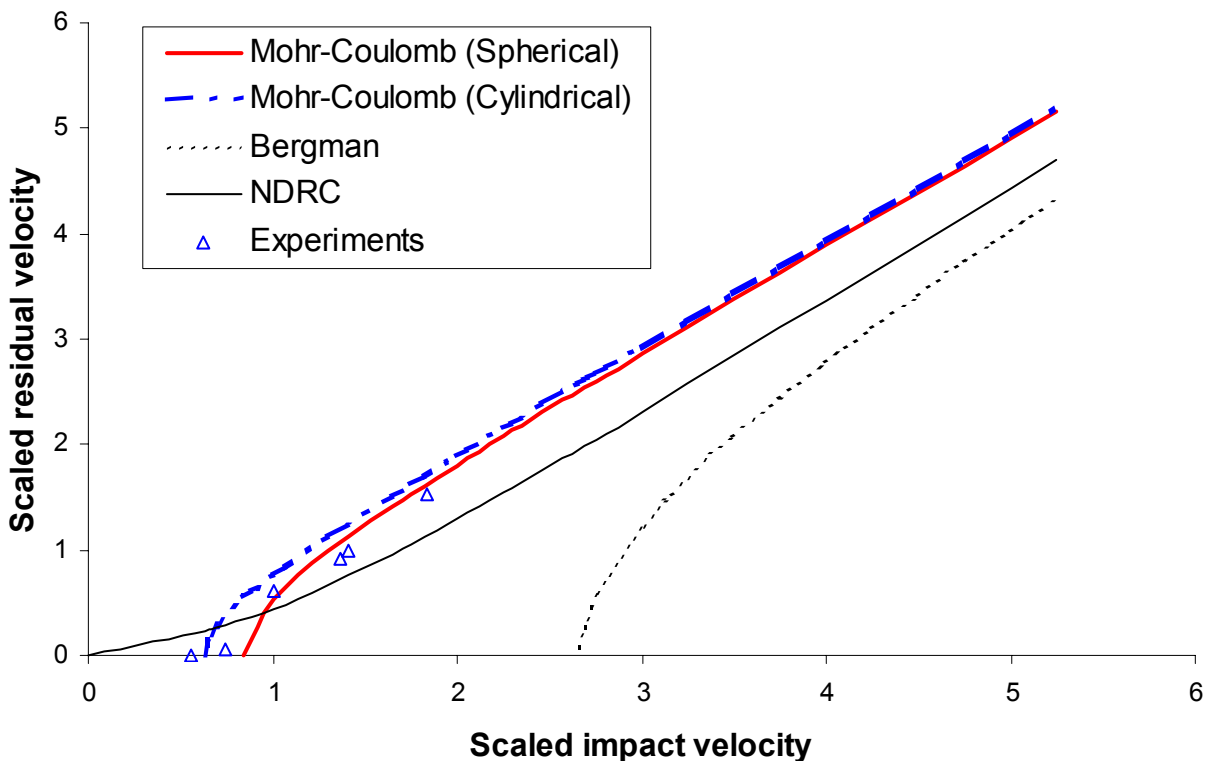
$$a = \sqrt{(1-\kappa) \exp \left\{ -\frac{\pi N}{2 M} I(X_N, H) \right\}}$$

hvor

$$\kappa = \frac{\pi}{4 X_N} \frac{X_1^2 + 2 I_x(X_1, X_2)}{M/N + \pi X_N/4},$$

$$I(X_N, H) = \int_{X_N}^H \alpha(X) dX, \quad I_x(X_1, X_2) = \int_{X_1}^{X_2} X \alpha(X) dX$$

Som regel vil en numerisk løsning være nødvendig for å bestemme penetrasjonsdybden eller resthastigheten ved perforasjon med denne metoden.



Figur 5.8: Resthastighet som funksjon av anslagshastighet for 25 mm prosjektil og $H = 2$.

Selv om den analytiske tilnærmingen baserer seg på svært enkle materialbeskrivelser, har estimatene for resthastighet vist seg å gi god overensstemmelse både for perforasjon av stål og betong. Som et eksempel har vi i Figur 5.8 sammenlignet den analytiske formelen med eksperimenter med 25 mm prosjektil mot betongplater av tykkelse ca. 50 cm. Som det fremgår av figuren er FFI-formelen vesentlig mer nøyaktig enn tilsvarende formler fra Bergman og NDRC. Sammenligning med flere data er gitt i (18,19).

5.3.6 Evaluering av analytiske beregninger mot hydrokoder

For å undersøke nøyaktigheten av den analytiske penetrasjonsteorien ble det i (41) og (42) gjennomført en sammenligning av analytiske beregninger med Autodynsimuleringer. Den totale kraften på prosjektilet som funksjon av tid under penetrasjonsprosessen for eksakt samme problem ble beregnet både analytisk og numerisk. For penetrasjon i (relativt) myke mål ble det påvist en forskjell i kraften som funksjon av tid, men for den totale penetrasjonsdybden var det god overensstemmelse. For penetrasjon i harde mål ble det imidlertid en del avvik også i penetrasjonsdybde, men i mange slike tilfeller vil imidlertid prosjektilet deformeres slik at teorien uansett ikke er gyldig. Sammenhengen mellom beregning av plastisitet analytisk og i hydrokoder er også blitt studert (35).

Det ble tidlig i prosjektet påvist en viss underprediksjon ved anvendelse av Forrestals formel på missiler / prosjektiler med slank nesegeometri. Et eksperimentelt arbeid av begrenset omfang er gjennomført i denne forbindelse (28), og avvik på opp mot 25 % ble påvist. Forbedrede uttrykk er imidlertid utviklet i løpet av prosjektet (31, 32), men resultatene viser uansett viktigheten av ikke å ekstrapolere analytiske uttrykk ukritisk utenfor de parameterverdiene som datamaterialet gir grunnlag for.

5.4 Datamaskinverktøy basert på analytisk teori

Effektiv anvendelse av analytiske metoder av høy kvalitet vil ofte være avhengig av implementering på en datamaskin. En "kalkulator" for beregning av penetrasjon i forskjellige materialer er tidligere utviklet for bruk i Forsvarets Håndbok i våpenvirkninger. I prosjekt 766 har mer avanserte ekspertsystemer blitt designet.

Allerede tidlig i prosjektet hadde man laget et numerisk program for å løse CET-ligningene for et materiale med stykkevis lineær flytekurve (2). Senere ble dette programmet utvidet og et grafisk brukergrensesnitt ble utviklet (40). I sin endelige form kan brukeren enkelt angi data for prosjektil og mål, for deretter å få beregnet enten penetrasjonsdybde, resthastighet dersom perforasjon, ballistisk grense eller nødvendig måltykkelse for å forhindre perforasjon. Det grafiske brukergrensesnittet er illustrert i Figur 5.9.

For penetrasjon av lange eroderende prosjektiler er det laget et tilsvarende verktøy basert på Walker-Anderson modellen (20,21). Det ble også foretatt noen små modifikasjoner av selve modellen.

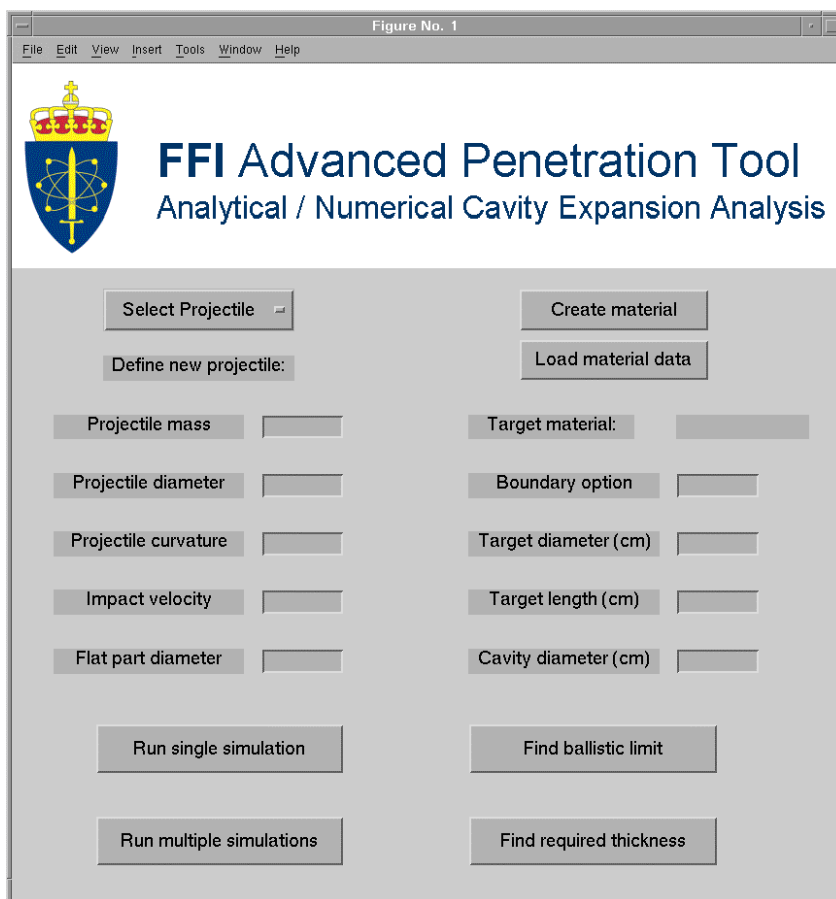


Figure 5.9: GUI for program til beregning av penetrasjon

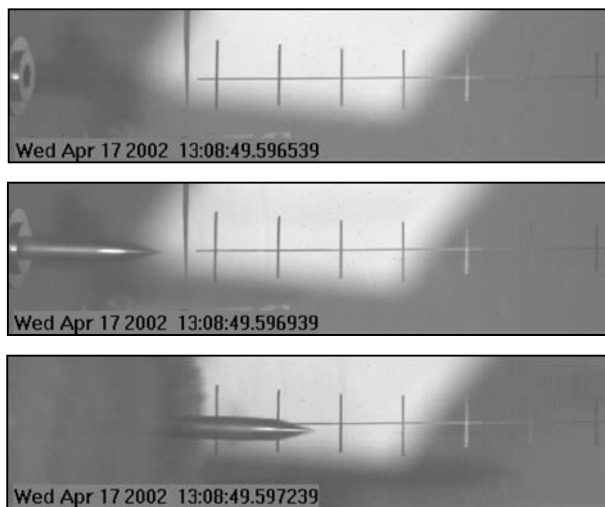
De amerikanske kodene Penco-2D og Pencrv-3D ble også evaluert for mulig bruk ved FFI (36). Programmet Pencrv-3D leveres som støtteverktøy til den nyeste versjonen av manualen TM 5-855-1: "Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects". Manualen brukes i forholdsvis stort omfang, og det foreligger planer om å innfase den som standardverktøy i NATO. Disse må imidlertid betraktes som "engineering-koder", siden det viste seg å være lagt begrenset vekt på en god fysisk beskrivelse av den underliggende fysikken. Pencrv-3D er derfor ikke innført for aktiv bruk ved FFI.

5.5 Gjennomføring av skyteforsøk

I løpet av prosjektet er det gjennomført en stor mengde skyteforsøk. Nedenfor følger en oppsummering av de viktigste seriene:

- Ulike 12 mm prosjektiler på FFI med en eldre laboratoriekanon (15). Hensikten var å validere Forrestals formel for penetrasjon i betong og utvidelsen av den som FFI har stått for.
- 30 mm prosjektiler på FFI (28). Formålet var å undersøke betydningen av tilslagsstørrelse i betongen mhp korrekte skaleringsprosedyrer under forsøk, samt ytelsen av Small Diameter Bomb mot høyfast betong og granitt. Videre ble det utført skyteforsøk med fragmentsimulator på oppdrag fra FLO/Land. Spesielt har skyteforsøk mot granitt indikert at våpenets strukturelle styrke spiller en vesentlig rolle for ytelsen, og at tandemstridshoder kan være påkrevet i slike tilfeller.

- 152 mm instrumentert prosjektil (ANNC III-16, Bofors) (24,25). I samarbeid med DERA, FOI og TNO ble det gjort et omfattende arbeid med tunge bidrag fra alle aktører. FFI hadde ansvar for design og bygging av prosjektilene. Nedbremsing ved inntrengning i målet ble målt, slik at detaljert sammenligninger med simuleringer kunne gjennomføres.
- Ulike forsøk i Sverige innen HPC-samarbeidet. Se relevant rapportering i (4,12).
- Forsøk med 30 mm APFSDS-ammunisjon på Raufoss, i samarbeid med NTNU/FBT.
- Fullskalaforsøk i Frankrike med prototyp på ny artillerigranat under EUCLID RTP 14.08. Prosjektet har vært representert i styringsgruppen i dette EUCLID-prosjektet. Se referanse (26).



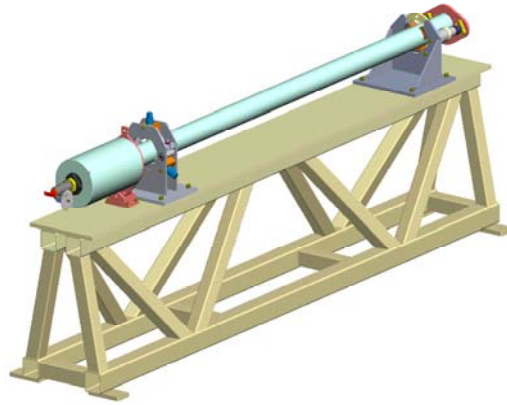
Figur 5.10: 30 mm prosjektil skutt ved FFI (Video: FLO/Land T&U)

6 DP3: BYGGING AV INSTRUMENTERT KANON

6.1 Laboratoriekanon - 30 mm kaliber

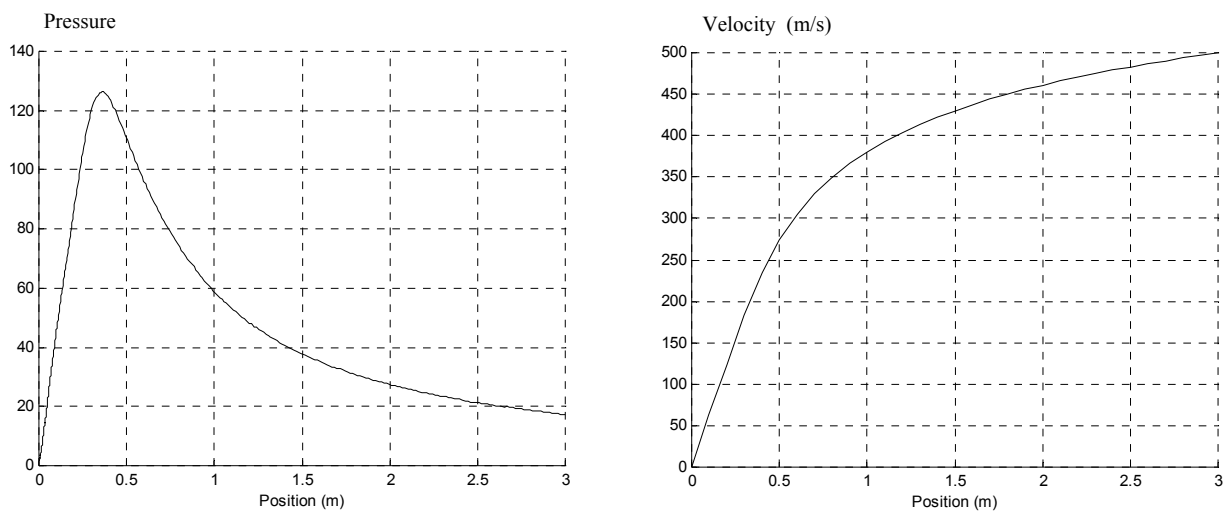
I løpet av P766 er det bygget en laboratoriekanon for bruk under skyteforsøk i vid forstand. Kanonen er både konstruert og bygget ved FFI. Selve maskineringen av løpet krever imidlertid særskilte verktøymaskiner og spesialkunnskap, og ble satt bort til en ekstern leverandør.

Laboratoriekanonen er kruttdrevet, og kan anvendes til testskyting i vid forstand med ulike prosjektiltyper opp til 30 mm kaliber og hastigheter opp til ca 1900 m/s. Dette oppnås ved bruk av en glattborret pipe og sabot-ammunisjon. Ved senere behov kan den anvendes som første trinn i en lettgass-kanon. Dette må imidlertid avveies kritisk mot innkjøp av tjenester ved andre laboratorier.



Figur 6.1: Skisse av FFI-designet 30 mm kanon med utgangspunkt i konstruksjonstegninger, samt fotografier etter ferdigstilling

Forbrenning av krutt er en kompleks prosess, hvor hastigheten på den kjemiske reaksjonen avhenger av en rekke parametre (26). Av særskilt betydning er at reaksjonsraten er korrelert med det aktuelle forbrenningstrykket på en ikke-lineær måte. Dette innebærer at trykkøkningen for to identiske kruttmengder vil være avhengig av prosjekttilmassen, og selv en liten økning i prosjekttilmasse eller kruttmengde kan gi kritiske trykkverdier. Kunnskap om forløpet er av stor viktighet for å forsikre seg om at det kammertrykket holdes innenfor akseptable og trygge verdier.



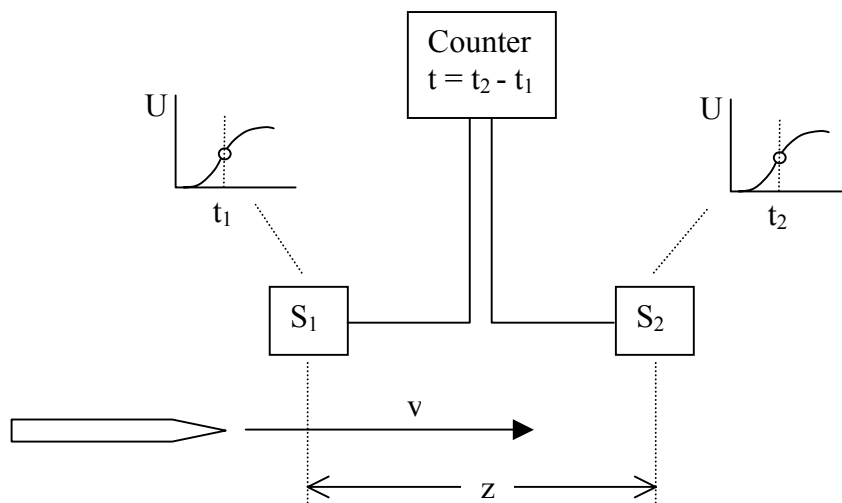
Figur 6.2: Eksempel på målt trykkforløp i kammeret som funksjon av prosjektilets forflytning fra utgangsposisjonen, samt beregnet prosjekttilhastighet.

Det er instruktivt å illustrere det generelle trykkforløpet under en typisk firing; dette er vist i Figur 6.2. Etter en viss tid, og før prosjektilet har forflyttet seg særlig langt fra sin utgangsposisjon i kammeret, er forbrenningen ferdig. Gassen fortsetter å utvide seg som et resultat av det høye trykket. Som en tilnærming kan dette betraktes som adiabatisk ekspansjon av en ideell gass.

Det er totalt gjennomført 65 firinger i prosjektperioden, slik at en vesentlig erfaringsdatabase er bygget opp. Systematiske målinger av kammertrykk og teoretiske beregninger benyttes for å unngå overbelastning.

6.2 Utstyr for hastighetsmåling

Nøyaktig kjennskap til hastigheten på prosjektilet er et grunnleggende krav under skyteeksperimenter med en laboratoriekanon. Dette gjøres vanligvis ved å måle flytiden mellom to målepunkter (vi velger å kalle dette et 2S-system). Andre alternativer kan være basert på måling av Doppler-skift, som ved enkelte radar-baserte systemer. Prinsippet for hastighetsmåling er illustrert i Figur 6.3.



Figur 6.3: Prinsipp for hastighetsmåling. Både nøyaktigheten i plassering av detektorer, tellerens nøyaktighet og kjennskap til detektorenes respons er avgjørende for den totale nøyaktigheten i målingen. Ved FFI brukes stort sett et egedesignert folieoppsett som muliggjør en nøyaktighet på ± 1 m/s ved 500 m/s.

I et 2S-system vil den totale usikkerheten i målingen av hastigheten v være bestemt av to faktorer:

- Usikkerheten s_z i den målte avstanden z mellom sensorene S_1 and S_2
- Usikkerheten s_t i bestemmelsen av den representative flytiden $t = t_2 - t_1$.

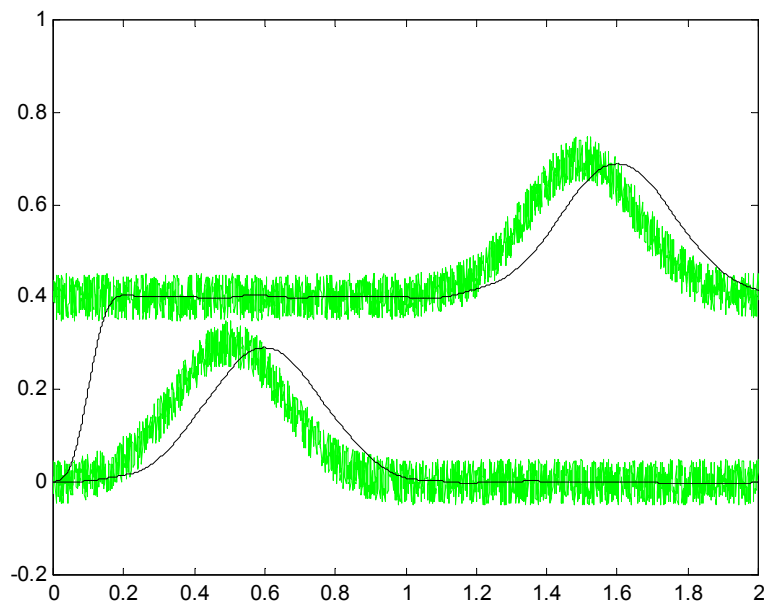
Siden vi ganske enkelt har at $v = z/t$, gir den vanlige 1. ordens-tilnærmingen for sammensatte usikkerheter

$$s_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial z} s_z\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} s_t\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{s_z}{t}\right)^2 + \left(-\frac{zs_t}{t^2}\right)^2},$$

eller ekvivalent gitt som relativ (prosentvis) usikkerhet

$$\frac{s_v}{v} = \frac{ts_v}{z} = \sqrt{\left(\frac{ts_z}{zt}\right)^2 + \left(\frac{zts_t}{zt^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{s_z}{z}\right)^2 + \left(\frac{s_t}{t}\right)^2}.$$

Det er svært viktig å kjenne responsen på sensorene, samt hvilken innvirkning støy har på når telleren trigger på hver sensor. Det beste vil vanligvis være å filtrere signalet før tidsmålingen foretas, spesielt dersom trigger-signalerne har slake flanker (som for eksempel ved bruk av induktive spoler). Dette er illustrert i Figur 6.4, hvor et (syntetisk generert) signal fra et induktivt system er filtrert ved å bruke programpakken Matlab.



Figur 6.4: Eksempel på et (syntetisk generert) signal fra et induktivt detektorsystem (spoler). Signalet er filtrert i programpakken Matlab med et filter av orden 200 og nedre grensefrekvens 3000 Hz.

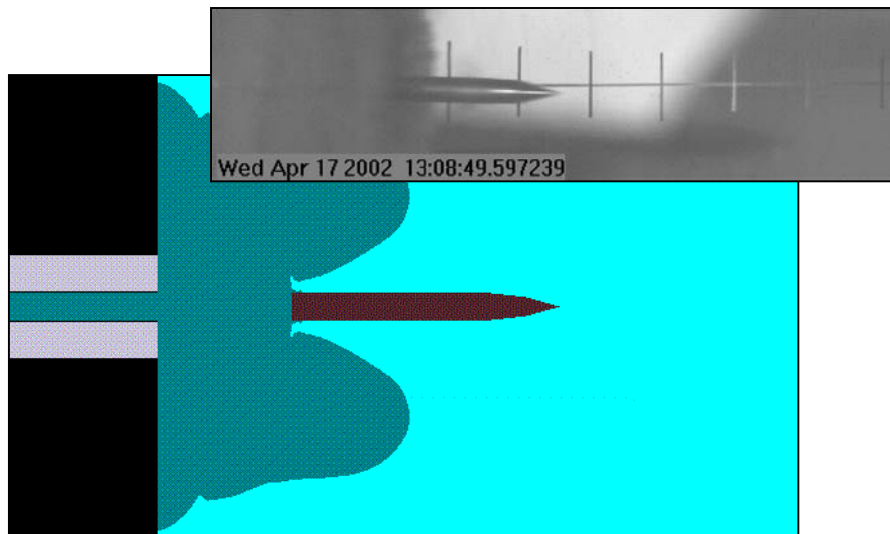
Siden kanonen er glattborret, og prosjektilene derfor ikke er spinnstabilisert, er det ønskelig å måle hastighet og plassere målplaten så nær munningen som mulig. Dette skaper problemer for hastighetsmålinger fordi sjokkbølgen foran prosjektilet (luftsøylen som skyves ut av løpet) såvel som varme og magnetiske kruttgasser som "løper forbi" prosjektilet i første fase har potensiale til å ødelegge eller trigge sensorer. Det er gjort en markedsundersøkelse angående kommersielle systemer (laser, doppler-radar, aktive spoler). Videre er det eksperimentert med egne passive spolesystemer. Et egendesignet robust foliesystem i optimalisert avstand er inntil videre valgt, noe som muliggjør skyteavstander på 150 cm.

I fremtiden anbefales det imidlertid å utvikle et system for måling av hastigheten *før* prosjektilet forlater løpet. Dette kan gjøres ved 2 eller 3 trykkmålinger i ytre del av selve løpet (som gir passeringstider), og hvor det gjøres korreksjoner for både økningen foran siste sensor og piperekylen. Se (29) for flere detaljer.

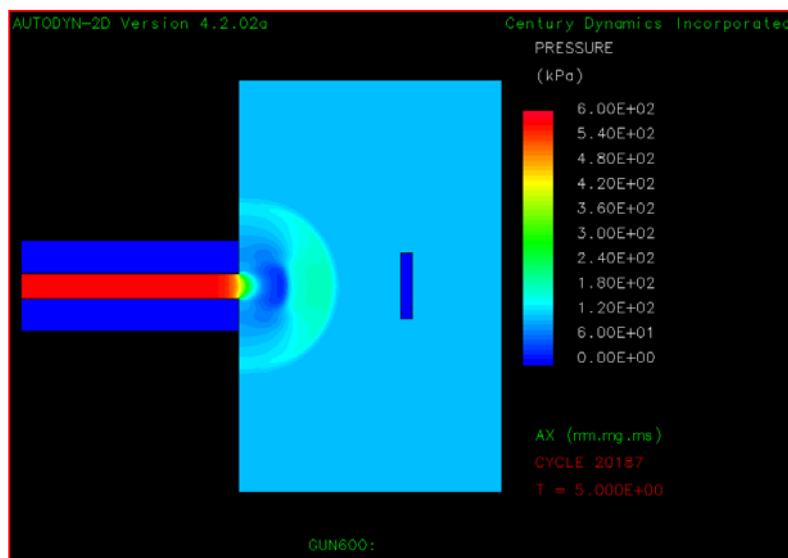
6.3 Fluidynamikk

Det er gjennomført et utvalg teoretiske beregninger av gassdynamikk ifm kartlegging av munningsmiljøet for laboratoriekanon. Beregningene er gjort med Euler-prosessen i det numeriske regneverktøyet Autodyn, og tar blant annet ikke hensyn til turbulensfenomener. Det

har likevel vist seg at resultatene er anvendelige for praktiske design-formål. Metoden anbefales brukt ved fremtidige behov. To av simuleringene er illustrert i Figur 6.5 og 6.6.



Figur 6.5: Eksempel på sjokkfront som skyldes at prosjektilet skyver luft foran seg i løpet. Simulering i Autodyns Euler-prosessor.



Figur 6.6: Eksempel på simulering av kruttgassenes utbredelse sammenholdt med høyhastighetsvideo. Simuleringen er gjort i 2D med Autodyns Euler-prosessor.

7 DP4: MATERIALDATABASE FOR FJELL

I henhold til prosjektforslaget skulle det etableres en materialdatabase for fjellkvaliteter som er aktuelle i forbindelse med norske militære anlegg.

Etter avklaringer i prosjektrådet ble det imidlertid besluttet at oppbygging av en materialdatabase skulle erstattes av en grundigere behandling av to materialer. Bakgrunnen for dette er at fremskaffelse av data til avanserte materialmodeller viste seg å kreve svært avanserte metoder og laboratorier. Det ble derfor sett på som mer verdifullt å gå i dybden metodemessig enn å sammenstille en større mengde data av dårligere kvalitet.

I et samarbeid med FOI og EMI er en type høyfast betong karakterisert ved hjelp av såkalt

mesomekanisk modellering. Dette innebærer at tilslag og sement karakteriseres separat gjennom flyer plate eksperimenter. ("Sement" betyr her betongen minus alle fraksjoner større enn 1 mm).

Tilslaget i denne betongen er granitt fra leverandøren Norstone. Sjøkkdata for granitt kommer følgelig ut som et "biprodukt" av karakteriseringen av betongen, og foreligger i referansene (10,45). Karakterisering av materiale nummer to har ikke blitt gjennomført innenfor prosjektets rammer. Dette er et avvik i forhold til prosjektavtale og avklaringer i prosjektrådet.

Kvasi-statisk skjærstyrke kan i prinsippet måles med en GREAC- eller Hoek-celle. GREAC-oppsettet ved FFI er bygget om til å kunne teste granitt og andre bergarter. Bergarter som er tilstrekkelig homogene og isotrope kan testes i mindre skala enn betong, slik at høyere trykk kan oppnås. Dette er imidlertid mekanisk krevende. Stempler og GREAC-sylinder av wolfram er fremstilt til formålet, slik at dette problemet er løst.

En annen utfordring er imidlertid maskinering av prøvestykker med høy presisjon. Det har ikke lyktes å finne et verksted med "nøkkelferdig" maskineringskompetanse innenfor dette prosjektet. Bruk av dreiebenk med roterende verktøy vil være nødvendig, og et slikt oppsett må eventuelt bygges opp. Testing av fjell med GREAC-celle kan derfor foreløpig ikke gjennomføres ved FFI. Det anbefales inntil videre å benytte data fra litteraturen ved modellering av fjell.

I sum er dynamiske materialdata for granitt delprosjektets eneste hovedresultat. Dette innebærer et avvik fra avtalt fremdrift.

8 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER

8.1 Hovedkonklusjoner

Prosjektets hovedformål har vært å etablere kompetanse og state-of-the-art-metoder for beregning av virkningene av moderne KE-våpen på anlegg av betong og fjell. Aktuelle anvendelser er

- Vurdering av sårbarheten til stasjonære anlegg
- Vurdering av yteevne til nye våpensystemer til egne styrker
- Beregning av ytelsen til moderne beskyttelsesmaterialer benyttet på kjøretøyer og i personlig beskyttelse

FFI har i løpet av prosjektet etablert metoder og kompetanse på linje med ledende miljøer i Europa innenfor numerisk beregning av dynamiske laster. Et solid metodegrunnlag for å analysere sårbarhet av betongmål overfor virkningen av moderne våpen er fastlagt, og prosjektets hovedmål anses å være oppfylt.



Figur 8.1: Tysk Tornado jagerbomber som bærer to KEPD 350 "TAURUS" missiler. Venstre bilde viser missilets tandem-konstruksjon, med hulladning og hovedpenetrator (Janes Air Launched Weapons version 42)

Den teoretiske "verktøykassen" som er bygget opp i løpet av prosjektet spenner over et vidt spekter av metoder, fra enkle håndbokformler til avanserte hydrohodeberegninger i full 3D kjørt på en av FFIs parallell-datamaskiner. Mellom disse ytterpunktene finner vi "mellomløsninger" som datamaskin-assistert analytisk teori og kombinasjonen hydrokode / analytisk teori. Hvilke verktøy som bør anvendes på en bestemt oppgave avhenger av problemets kompleksitet, tilgjengeligheten av tekniske beskrivelser for våpenet og gode materialdata for målobjektet, samt brukerens kunnskapsnivå.

Eksperimentelt utstyr er etablert på et nøkternt og hensiktsmessig nivå. Et hovedverktøy er en 30 mm laboratoriekanon designet "in-house". Utstyr for triaksiell statisk materialtesting er bygget. Selv om den såkalte GREAC-cellen i utgangspunktet er en enkel innretning, kreves det stor omtanke og høy presisjon samt gode analysemetoder for å produsere resultater av høy kvalitet. Verdien av slike resultater som "byttmiddel" i internasjonalt samarbeid kan vanskelig overvurderes.

Ved angrep mot overdekningen på fjellanlegg vil våpenets strukturelle styrke spille en svært vesentlig rolle. Ved harde fjellkvaliteter og stor overdekning vil en tradisjonell penetrator generelt ikke være virkningsfull. En tandemladning med en "precursor" i form av en hulladning vil være påkrevet. Beregning av slike kombinerte virkninger kan ikke forutsies ved hjelp av tradisjonelle håndbokformler, og er også svært krevende med "state-of-the-art"-metoder.

Eksperimentelle resultater i prosjektet kombinert med opplysninger fra åpne kilder, indikerer at effekten selv av slike moderne våpen er vekslende mot harde fjellkvaliteter. Dersom man ønsker å følge utviklingen videre innenfor yteevnen til stasjonære anlegg i fjell, er det videre arbeid med yteevnen av tandemstridshoder som bør prioriteres.

Prosjekt 766 har levert resultater til ulike samarbeidsprosjekter. Tett faglig kontakt er etablert med nøkkelmiljøer innenfor følgende utenlandske institusjoner:

• TNO	(Nederland)	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek
• DSTL	(England)	Defence Science and Technology Laboratory
• EMI	(Tyskland)	Ernst-Mach-Institut
• FOI	(Sverige)	Totalförsvarets Forskningsinstitut
• DGA/CEG	(Frankrike)	Délégation Générale pour l'Armement / Le Centre d'Etudes de Gramat
• Denel	(Sør-Afrika)	

FFI har bidratt vesentlig i det norsk-svenske HPC-prosjektet (High Performance Concrete), som ble gjennomført i samarbeid mellom de norske institusjonene FBT, FO, FFI og svenske FOI, HKV og FORTV (3,4,12). I dette arbeidet ble bruk av høyfast betong til forsterkning av eksisterende anlegg utredet i detalj, både teknisk og kostnadsmessig. Følgende delprosjekter ble gjennomført: (I) Fremtidig våpentruassel, (II) Materialer og strukturell design, (III) Analyse og numeriske simuleringer, (IV) Feltforsøk og produksjon, (V) Retningslinjer for anvendelse. FFI hadde ansvaret for delprosjektene (I) og (III).

På teknisk nivå er en hovederkjennelse at de mest avanserte materialmodellene til bruk i hydrokoder for beskrivelse av sprø materialer (som betong og fjell) er svært fleksible, og at hovedproblemet er tilgangen til pålitelige materialdata, spesielt knyttet til *triaksiell tøyingsrateavhengighet* og *skadeutvikling*. Fremskaffelse av slike data er vanskelig og kostbart, og i enkelte tilfeller finnes det ikke gode eksperimentelle metoder. Internasjonalt samarbeid er nødvendig.

Numeriske skjema som SPH peker seg ut som spesielt velegnet for å modellere strekkbrudd og oppsprekking. Man må imidlertid gjøre svært grundige avveininger mellom *numeriske* og *materialmessige* brudd, ved å tilpasse de ulike kriteriene i modellen til hverandre. Nettbaserte Lagrange-skjema med automatisk regenerering og uten numerisk erosjon er en annen lovende teknikk. Slike skjema finnes imidlertid ikke i Autodyn som benyttes som standard ved FFI. Som nevnt i kapittel 2, utmerker numeriske metoder seg gjennom sin fleksibilitet med hensyn på hvilke problemer som kan formuleres, og ved at metoden utgjør et virtuelt laboratorium hvor man kan følge materialets fullstendige tilstand av spenning og tøyning til ethvert tidspunkt. Verdien av numeriske metoder kan derfor ikke overvurderes, selv om vel-kalibrerte semianalytiske metoder kan gi like god nøyaktighet på enklere problemer.

De samme metodene som prosjektet har undersøkt kan benyttes til å beregne virkninger av detonasjoner og for beregning av ytelsen til moderne beskyttelsesmaterialer som keramikk og fiberlaminater. Resultatene og kunnskapen som er etablert danner et solid grunnlag for avanserte beregninger av ytelsen til beskyttelsessystemer i vid forstand.

8.2 Numeriske beregninger - spesielle svakheter som er avdekket

Enkelte områder har utpekt seg som særlig kritiske for å kunne utnytte numeriske beregninger på sprø ("brittle") materialer. De viktigste er knyttet til følgende:

- Det finnes ingen god beskrivelse av skadeutviklingen i sprø materialer beskrevet ved plastisitetsteori. Flere modeller inneholder en skadeparameter og en kobling mellom denne og de øvrige materialeegenskapene, men eksperimentelle data og metoder er ikke tilgjengelige.
- Det finnes ingen eksperimentelle data eller kvalifiserte metoder for å beskrive tøyingsrateavhengighet under triaksiale spenningstilstander.
- Kjøretiden for simuleringer i full 3D er fremdeles svært lang. Videre er de numeriske modellene mer avanserte i 2D, siden nye metoder og sammenkobling av ulike metoder til en

integrrert enhet er betraktelig enklere i dette tilfellet.

- Prosjekt 766 har i hovedsak jobbet med udeformerte prosjektiler og missiler. Gjennom en begrenset studie er det avdekket at det kan være vanskelig å beskrive eroderende prosjektiler på en fysisk tilfredsstillende måte.
- Det er påvist underprediksjon ved anvendelse av Forrestals formel og liknende på missiler / prosjektiler med slank nesegeometri. Et eksperimentelt arbeid av begrenset omfang er gjennomført i denne forbindelse (REF), og avvik på opp mot 25 % ble påvist. Forbedrede uttrykk er utarbeidet, men forsiktighet må likevel utvises.

8.3 Problemer som ikke har vært behandlet

- Koblingen mellom en detonerende ladning og en belastet struktur, som er vesentlig for en rekke problemer (f eks ytelse av missiler) har ikke vært berørt i Prosjekt 766. Beregning av detonasjonsforløp har imidlertid vært behandlet ved FFI innenfor FFIs Multi Purpose-prosjekter og enkelte oppdrag. En bedre integrasjon av denne kunnskapen og resultatene fra dette prosjektet bør etterstrebes.
- Numeriske beregninger av eroderende prosjektiler i avanserte materialer har ikke vært behandlet i større detalj. Dette kan være av betydning for fremtidige hypervelocity-missiler, samt ved beskrivelse av enkelte typer pilammunisjon.
- Validerte numeriske beregninger har så langt bare blitt gjennomført for et begrenset antall typer målmaterialer grunnet begrenset tilgang på tilstrekkelig gode materialdata, og kostnadene for å fremskaffe slike.
- Detaljert oppførsel av betongmål med armering har ikke vært behandlet Dette krever store 3D-simuleringer, og er dessuten ansett å være nærmere knyttet til strukturdynamikk enn materialmodellering. Praktisk erfaring viser imidlertid at effekten av armering vanligvis er liten, bortsett fra for modellering av utstøtning og ved andre rene strekkbrudd.

8.4 Videre arbeid

Sårbarhet av stasjonære anlegg står ikke sentralt i de scenarier som utvikles for bruk i Forsvarets langsiktige planlegging. Arbeidet i Prosjekt 766 bør derfor ikke gis en direkte videreføring ved FFI. En dreining mot problemstillinger knyttet til bruk av lette beskyttelsesmaterialer og beskyttelse av mobile enheter og ytelsen av egne våpen bør i stedet vektlegges.

Metodegrunnlaget og kontaktnettet som er etablert i Prosjekt 766 er svært relevant for slikt fremtidig arbeid. I den grad en begrenset innsats innenfor metodemessige problemstillinger knyttet til betong og fjell er nødvendig for å videreutvikle gode relasjoner med ledende miljøer, bør dette vurderes.

Det er imidlertid behov for bedre diagnostisk utstyr ifm ballistiske skyteforsøk. FFI har et eldre høyhastighets filmkamera, men verken høyhastighets video, röntgenblitz eller muligheter for å

måle oppbremsing av prosjektiler i målet.

Eksperimentell aktivitet knyttet til materialkarakterisering er svært ressurskrevende, både hva gjelder utstyr, kompetanse og tilgang til personell. Den beskjedne virksomheten i prosjektet har vært avhengig av stor fleksibilitet og ekstraordinær innsats fra enkeltpersoner, og det har vist seg som en nyttig "inngangsbillett" til internasjonale miljøer. Man må imidlertid utvise stor tilbakeholdenhet med å initiere slik aktivitet i fremtiden uten grundig evaluering av omfanget av den innsats som kreves.

Man bør vurdere en viss oppfølging av våpenytelse mot fjellanlegg også i fortsettelsen. Fokus bør i så fall ligge på selve våpensystemene snarere enn på målmaterialene – og særlig knyttet til tandemstridshoder og missilenes strukturelle integritet.

REFERANSER

Med unntak av (1), (4), (5), (6), (10) og (45) er alle refererte dokumenter produsert i FFI-prosjekt 766. For videre oversikt over faglitteratur heveses til referanselistene i de enkelte dokumentene.

- (1) AGARD, Aerospace 2020, AGARD-AR-360, ISBN-92-836-1058-X
- (2) Berthelsen P A, Cavity expansion og penetrasjonsmekanikk - Materialmodeller og numeriske løsningsmetoder, FFI/RAPPORT 99/04260
- (3) Johansson G, Grandum Ø, Anslagshastigheter for flyleverte bomber, FFI/NOTAT 99/02234
- (4) Markeset G, High Performance Concrete (HPC) Research and Development Project – Final report, Fortifikatorisk notat nr. 291/01, Desember 2001
- (5) Meyers M A, Dynamic behavior of materials, Wiley-Interscience, New York, 1994
- (6) Neville A M, Properties of concrete, Longman Group, Harlow Essex, 1995
- (7) Olsen Å A F, Sjøel H, Teland J A, Impact on modular concrete targets, FFI/RAPPORT 2001/05787
- (8) Olsen Å A F, Teland J A, Rapid 3D hydrocode simulations with a virtual target - Cavity Expansion Theory implemented as a subroutine in Autodyn 3D, FFI/RAPPORT 2002/00575
- (9) Olsen Å A F, Teland J A, Modelling of granular materials in the Autodyn hydrocode, FFI/RAPPORT 2001/05787
- (10) Riedel W, Beton unter dynamischen Lasten – Meso- und makromekanische Modelle und ihre Parameter, EMI-Bericht 6/00, 2000
- (11) Rusås P-O, Teland J A, Matlab toolbox for processing of GREAC cell data, FFI/RAPPORT 2000/02032
- (12) Sjøel H, Final report HPC project - subproject 3 - Analysis and numerical simulations Forsvarets bygningstjeneste - Fortifikatorisk notat 294/01
- (13) Sjøel H, Teland J A, Prediction of concrete penetration using Forrestal's formula, FFI/RAPPORT 99/04415
- (14) Sjøel H, Teland J A, Extension and improvement of the NDRC formula based on experiments with 12 mm steel projectiles against concrete targets, Proceedings from the 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Berlin, Germany, mai 1999
- (15) Sjøel H, Teland J A, Kaldheim Ø, Penetration into concrete – Analysis of small scale experiments with 12 mm projectiles, FFI/RAPPORT 2000/04414

- (16) Sjøel H, Teland J A, Analysis of existing formulas for penetration into concrete, 10th Int Symposium on the interactions of the effects of munitions with structures, San Diego mai 2001
- (17) Sjøel H, Teland J A, Boundary effects in penetration of rigid projectiles into High Performance Concrete (HPC) targets, 10th Int. symposium on the interactions of the effects of munitions with structures, San Diego mai 2001
- (18) Sjøel H, Teland J A, Perforation of concrete targets, FFI/RAPPORT 2001/05786
- (19) Sjøel H, Teland J A, Analytical model to determine the ballistic limit of concrete targets, 11th Int Symposium on the interactions of the effects of munitions with structures, Mannheim, mai 2003
- (20) Soleng H, Svinsås E, Penetration modelling with uncertainty quantification using the Walker-Anderson model, FFI/RAPPORT 2000/05876
- (21) Soleng H, Penetration.m version 1.0: A Mathematica implementation of an analytical penetration model, FFI/NOTAT 2000/05875
- (22) Soleng H, A stochastic two-component material model: Documentation of an implementation as Fortran 90 subroutines in Autodyn, FFI/RAPPORT 2001/01089
- (23) Soleng H, A stochastic SPH flaw model and the evolution of fractures: Documentation of an implementation as Fortran 90 subroutines in Autodyn, FFI/RAPPORT 2001/01090
- (24) Svinsås E, O'Carroll C, Wentzel C M, Carlberg A, Benchmark trial designed to provide validation data for hydrocodes, 10th Int. Symposium on the interaction of the effects of munitions with structures, San Diego, mai 2001
- (25) Svinsås E, Benchmark trial designed to provide validation data for hydrocodes - artikkel presentert under IEMS-konferansen i San Diego, USA, mai 2001, FFI/NOTAT 2001/04032
- (26) Svinsås E, Target size in perforation experiments – Pre-test calculations regarding firing tests in EUCLID RTP 14.08 / THALES JP 14.15, FFI/NOTAT-2002/04509 (ikke offentlig)
- (27) Svinsås E, Teland J A, Euclid RTP 14.08 / Thales JP 14.15; Firing tests of anti bunker artillery shell – Summary of material tests for concrete, FFI/RAPPORT-2002/04155
- (28) Svinsås E, Utkast – Resultater fra skyteforsøk med skalerte prosjektiler mot betong, FFI 3-4 juli 2002, 2003/02602-1/FFIBM/ESv-130
- (29) Svinsås E, Fykse H, Principles for close-in measurement of muzzle velocity for projectiles launched with a smooth-bore powder gun, FFI/NOTAT-2003/02575
- (30) Teland J A, Sjøel H, An examination and reinterpretation of experimental data behind various empirical equations for penetration into concrete, Proceedings from the 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Berlin, Germany, mai 1999

- (31) Teland J A, Sjøøl H, Penetration into concrete by truncated projectiles, FFI/RAPPORT 2000/05292
- (32) Teland J A, Sjøøl H, Penetration into concrete by truncated projectiles, Int Journal Impact Engineering (akseptert for publikasjon)
- (33) Teland J A, Sjøøl H, Boundary effects in penetration into concrete, FFI/RAPPORT 2000/05414
- (34) Teland J A, A review of empirical equations for missile impact effects on concrete, FFI/RAPPORT 97/05856
- (35) Teland J A, Moxnes J F, Plasticity computation in hydrocodes compared with analytical theory, FFI/NOTAT 2000/05518
- (36) Teland J A, Undersøkelse av PENCO2D - et dataprogram for beregning av penetrasjon i betong og geologiske materialer, FFI/NOTAT 2001/04806 (ikke offentlig)
- (37) Teland J A, A first approach to penetration of tandem charges into concrete, FFI/RAPPORT 2001/00624
- (38) Teland J A, Cavity expansion theory applied to the penetration of targets with pre-drilled cavities, 19th Int. symposium on ballistics, Interlaken, Sveits, mai 2001
- (39) Teland J A, Svinsås E, Everything you ever wanted to know about material testing but were afraid to ask, FFI/RAPPORT 2003/ - (under utgivelse)
- (40) Teland J A, Multifunctional numerical tool for penetration analysis, FFI/RAPPORT-2002/04647
- (41) Teland J A, Moxnes J F, Analytical cavity expansion penetration models compared with numerical simulations, Proceedings of the 11th Int Symposium on the interactions of the effects of munitions with structures, Mannheim, mai 2003
- (42) Teland J A, Moxnes J F, Analytical cavity expansion penetration models compared with numerical simulations, FFI/RAPPORT-2003/00934
- (43) Teland J A, Examination of yawed impact using a combined analytical and numerical approach, Proceedings of the 11th Int Symposium on the interactions of the effects of munitions with structures, Mannheim, mai 2003
- (44) Teland J A, Examination of yawed impact using a combined analytical and numerical approach, FFI/RAPPORT-2003/00935
- (45) Wicklein M, Riedel W, Mesomechanical Characterization of a High Strength Concrete – Experimental Investigations and Material Modelling, Report E 14/02, 2002

A NOTASJON

Nedenfor følger en liste over variabelnavn som ikke er eksplisitt forklart i teksten.

x	Penetrasjonsdybde
d	Prosjektilets diameter
m	Prosjektilets masse
\square	Forhold mellom prosjektilets krumningsradius og diameter
\square_c	Enaksiell trykkfasthet
v	Prosjektilhastighet
\square_t	Målmaterialets massetetthet
r	Prosjektilnesens (ogive) krumningsradius
R	Forhold mellom initiell kanaldiameter i målet og prosjektilets diameter (ved beregning av ytelse for tandemladninger)
x_{init}	Distansen prosjektilet kan penetrere inn i et mål med en initiell (sår) kanal uten å komme i direkte kontakt med målmaterialet
x_l	Distansen prosjektilet penetrerer i et mål med en initiell (sår) kanal etter at det har kommet i direkte kontakt med målmaterialet
d_t	Målets diameter
d_{ep}	Diameter til elastisk-plastisk sone i målet
G	Skjærmodul
Y	Flytegrense (spenningstilstand som gir overgang til plastisk tilstand)
E	Youngs modul
\square	Poissons tall

FORDELINGSLISTE

FFIBM
Dato: 15. juli 2003

RAPPORTTYPE (KRYSS AV)		RAPPORT NR.	REFERANSE	RAPPORTENS DATO	
<input checked="" type="checkbox"/> RAPP	<input type="checkbox"/> NOTAT	<input type="checkbox"/> RR	2003/01999	FFIBM/766/130	15. juli 2003
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD			ANTALL TRYKTE UTSTEDT	ANTALL SIDER	
UGRADERT			33	45	
RAPPORTENS TITTEL			FORFATTER(E)		
SLUTTRAPPORT FOR PROSJEKT 766 - PENETRASJON I BETONG OG FJELL			SVINSÅS Eirik, TELAND Jan Arild		
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF			FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF:		
Bjarne Haugstad			Jan Ivar Botnan		

EKSTERN FORDELING
INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		Eirik Svinsås Paulus Plass 5 0554 Oslo	9		FFI-Bibl
1		Åge Andreas Falnes Olsen Fysisk institutt Postboks 1048 – Blindern 0316 Oslo	1		FFI-ledelse
1		Harald H Soleng Lilloseterveien 63F 0957 Oslo	1		FFIE
1		Per-Olav Rusås Sydlibakken 6 1747 Skjeberg	1		FFISYS
1		Forsvarsbygg	1		FFIBM
1		v/ Helge Langberg	1		FFIN
1		v/ Tore Børvik	2		Forfattereksemplar(er)
1		FO/HST	1		Bjarne Haugstad, FFIBM
1		KAMPUKS	1		Henrik Sjø, FFIBM
1		FLO/Land	1		Haakon Fykse, FFIBM
1		v/ Maj Ramm	1		Knut B Holm, FFIBM
1		v/ Ob Sveen	1		Svein E Martinussen, FFIBM
					Elektronisk fordeling: FFI-veven
					Svein Rollvik (SRo), FFIS
					Hege Jødahl (HeJ), FFIBM
					Ove Dullum (OSD), FFIBM
					John F Moxnes (JFM), FFIBM
					Øyvind Frøyland (OFr), FFIBM
					Lars Kvifte (LKv), FFIBM